

ОСНОВЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

В. А. Крупицкий

Лениздат 1959

В книге популярно изложены основы металловедения и термической обработки стали и чугуна. Последовательно освещены строение и свойства металлов и сплавов, теория и практика термической обработки углеродистой стали, а также особенности термической обработки легированной стали и чугуна. Книга предназначена для рабочих – термистов, а также может быть использована учащимися кружков техминимума и технических училищ.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Величественный план развития народного хозяйства СССР на 1959 – 1965 гг. предусматривает дальнейший резкий подъем машиностроительной промышленности, являющейся основным потребителем металла. Для обеспечения возрастающей потребности машиностроения в металле одновременно с увеличением производства металлов предусматривается также их более рациональное и экономное использование.

Значительная экономия металла может быть достигнута за счет снижения веса машин. Эта задача может быть решена путем применения низколегированных и легированных сталей, а также более полного использования свойств металлов. Современная техника располагает весьма могущественным способом изменения свойств металлов. Этим способом является термическая обработка. Она основана на способности металлов изменять свои свойства в результате различных режимов их нагрева и охлаждения. Например, применяя различные режимы тепловой обработки стали, можно увеличить ее прочность и твердость в 3—4 раза.

Над обеспечением необходимых свойств стали работают и сталеплавильщик, и литейщик, и кузнец, но наиболее важную роль здесь играет термист. Перед термистом стоит задача не только исправить дефекты предшествующей обработки стали (литья,ковки, сварки), но и формировать ее эксплуатационные свойства.

Качество машины в целом, ее безотказность в работе и долговечность в конечном итоге определяются результатом термической обработки металла. Ошибки, допущенные при термической обработке, могут иметь серьезные последствия, так как она является одной из завершающих операций изготовления изделия. Чтобы сознательно управлять процессом термической обработки и непрерывно его совершенствовать, нужно понимать сущность протекающих явлений. Знание основ термической обработки укажет термисту путь к пониманию с первого взгляда случайных неудач, сделает его носителем технического прогресса.

Предлагаемая книга предназначена в качестве пособия для повышения квалификации рабочих-термистов, имеющих общеобразовательную подготовку в объеме семи классов средней школы. Помимо основных положений из теории термической обработки, в книге приведены общие сведения о строении и свойствах металлов, без чего невозможно понимание процессов термической обработки. Кроме того, в книге даны сведения практического характера и справочные материалы, необходимые для работы термиста.

Глава I.

КРАТКИЙ ОБЗОР ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ И МЕТОДОВ ИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ.

Любая машина состоит из большого количества различных деталей. В процессе работы машины каждая деталь выполняет определенную роль. Таким образом, условия работы деталей машин весьма разнообразны. Так, например, шестерни должны быть износостойки, так как в процессе работы они подвергаются истиранию в результате трения друг о друга. Режущая кромка металлорежущего инструмента должна обладать твердостью, пружина — большой упругостью, обмотки электрических машин — высокой электропроводностью, лопатки паровых турбин не должны ржаветь в результате длительного соприкосновения с паром, детали самолетов должны быть возможно более легкими и т. п. Чтобы машина была долговечна, материалы, из которых изготавливаются ее детали, должны обладать определенными свойствами в зависимости от условий работы детали. Основные свойства металлов можно разделить на следующие группы: физические, химические и механические.

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА.

К физическим свойствам металлов относятся: цвет, удельный вес, плавкость, электропроводность. Рассмотрим главнейшие физические свойства, с которыми приходится встречаться при термической обработке.

Электропроводность и электросопротивление. Электропроводностью называется свойство вещества проводить электрический ток. Металлы являются хорошими проводниками электрического тока, но одновременно они в той или иной мере сопротивляются его прохождению, в результате чего часть электричества при прохождении через металл теряется. Таким образом, наряду с электропроводностью, металлы обладают противоположным свойством — электросопротивлением. Электросопротивление измеряется на специальных приборах и выражается в электрических единицах — омах. Чем больше число электросопротивления, тем меньше электропроводность металла, и наоборот.

Для сравнения электросопротивления различных металлов пользуются *удельным электросопротивлением*, которое показывает, какое электросопротивление имеет проводник сечением 1 мм^2 и длиной 1 м. Величина электросопротивления — важное свойство материалов, из которых изготавливаются электрические печи и приборы, а также изделия, подвергающиеся электрическим способам тепловой обработки.

Магнитные свойства. Эти свойства играют первостепенную роль в электромашиностроении. Железо и сталь обладают магнитными свойствами, т. е. они могут притягиваться магнитом и намагничиваться, поэтому из железа и стали изготавливают изделия, от которых требуются определенные магнитные свойства: например, постоянные магниты, сердечники трансформаторов, детали телефонных и телеграфных аппаратов и т. п. Наиболее важными характеристиками магнитных свойств металлов и сплавов являются *магнитное насыщение* и *коэрцитивная сила*. Способность стали намагничиваться под действием сильного магнита (магнитного поля) характеризуется магнитным насыщением, которое измеряется в гауссах. Коэрцитивная, или задерживающая, сила показывает способность металла или сплава оставаться в намагниченном состоянии, т. е. сохранять магнитные свойства и после снятия воздействия внешнего магнитного поля. Коэрцитивная сила измеряется в эрстедах. Следует отметить, что численное значение магнитных характеристик металла в значительной мере зависит от способа его термической обработки.

Теплопроводность. Способность тел проводить тепло при нагревании и охлаждении называется *теплопроводностью*. Это свойство важно для таких тел, которые должны передавать большие массы тепла или быстро отводить тепло (элементы котлов, нагревательные трубы, охлаждающие устройства). Чем больше теплопроводность металла, тем скорее и равномернее можно его нагреть или охладить. Тепловая обработка металлов,

отличающихся плохой теплопроводностью, сопряжена с трудностями. Таким образом, это свойство металлов особенно важно при термической обработке.

Расширяемость при нагревании. Твердые тела при нагревании увеличивают свои размеры. О степени этого увеличения можно судить по величине, которая называется *коэффициентом линейного расширения*. Коэффициент линейного расширения показывает, на какую часть увеличится каждая единица длины тела при нагревании его на 1°. Коэффициент линейного расширения железа равен 0,000012. Следовательно, железный стержень длиной 1 м. при нагревании на 1° удлинится на 0,000012 мм. Хотя величина коэффициента линейного расширения весьма незначительна, на практике при тепловой обработке изделий, имеющих большую длину, с этим свойством металлов приходится считаться. Расширение металлов при нагревании и сжатие их при охлаждении сопровождаются возникновением значительных усилий, которые могут оказать серьезное влияние на результаты термической обработки.

ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА.

Эти свойства характеризуют способность металла служить в окружении атмосферы, кислот, морской воды, пара и т. п. В процессе работы детали соприкасаются с воздухом, морской водой, паром или даже кислотами. Все эти вещества оказывают вредное воздействие на металл, разъедают его и приводят в негодность изделия. Разрушение металлов, происходящее под влиянием химического или электрохимического воздействия на них внешней среды, называется *коррозией*.

Коррозия называется *химической*, если она происходит под действием сухих газов или жидкостей, не проводящих электрический ток (бензин, керосин, смола и т. п.). Коррозия называется *электрохимической*, если она происходит при взаимодействии металла с жидкостями, проводящими электрический ток (вода, щелочи, кислоты и т. п.).

В результате коррозии массы металла приходят в негодность; требуются большие затраты на предохранение их от вредного влияния среды. В среднем в мировом масштабе от коррозии ежегодно теряется около 20 млн. т железа, что составляет примерно 10% его производства. В США подсчитали, что коррозия наносит ущерб, который выражается суммой около 5,5 млрд. долларов в год. Очень важным свойством металла является также способность его образовывать окалину (пленку окислов) в результате взаимодействия при высоких температурах с кислородом печных газов. С этим свойством приходится считаться при выборе материалов для деталей (например, оборудования термических цехов), от которых требуется малая окисляемость при высоких температурах. Материалы, хорошо сопротивляющиеся образованию окарины, называются *окалиностойкими*, или *жаростойкими*. При термической обработке стали имеет место нежелательное явление – обезуглероживание, т. е. уменьшение содержания углерода в поверхностном слое в результате химического взаимодействия кислорода печных газов с углеродом стали. Различные металлы обладают неодинаковой коррозионной стойкостью, т. е. способностью сопротивляться разрушению от воздействия окружающей среды. Способность металла подвергаться коррозии можно определить по изменению веса образцов за то или иное время протекания процесса коррозии. Если этот процесс сопровождается растворением металла в окружающей среде, то металл теряет в весе; если же процесс коррозии сопровождается окислением металла, то наблюдается обратное явление — увеличение веса образца. При совместном протекании процессов растворения и окисления металла коррозию не всегда можно выразить количественно.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ.

Механические свойства определяют способность металла без повреждения сопротивляться воздействию внешних сил. Если перечисленные ранее физические и химические свойства должны иметь лишь некоторые металлы, то механическими свойствами должны обладать все

материалы, которые применяются для изготовления деталей машин. От шестерни, вала или от лопатки паровой турбины не требуется электропроводности или каких-либо магнитных свойств. Однако шестерня, вал, лопатка паровой турбины, обмотка электрической машины, любой болт или гайка должны обладать определенными механическими свойствами, так как все детали машин в той или иной мере в процессе работы подвергаются воздействию внешних сил. Поэтому механические свойства – важнейшие свойства любого машиностроительного материала.

Основная задача термической обработки – изменять механические свойства металлов в таком направлении, чтобы они оказались наилучшими для данной детали. Внешние силы, действующие на деталь в процессе ее работы, весьма разнообразны: они могут растягивать или сжимать металл, изгибать или продавливать его и т. д., при этом каждое из указанных воздействий может производиться медленно, постепенно или мгновенно в виде удара. Механические свойства металлов и сплавов неодинаковы. Некоторые из них хорошо сопротивляются воздействию сжимающих усилий, но плохо выдерживают Растягивающие усилия; другие же хорошо сопротивляются воздействию плавно, постепенно приложенных усилий, но могут разрушаться при тех же усилиях, приложенных мгновенно в виде удара. При воздействии на деталь внешних сил она изменяет свою форму (растягивается, изгибается), т. е. деформируется. Если к детали приложены сравнительно небольшие усилия, то после прекращения их действия она принимает свою первоначальную форму, т. е. имевшая место деформация исчезает. Например, когда по железнодорожному рельсу катятся колеса вагона, то под действием силы тяжести вагона рельс прогибается. Но как только колесо вагона сходит с рельса, он выпрямляется и принимает свою первоначальную форму. Это свойство материалов принимать первоначальную форму после прекращения действия сил называется упругостью, а деформация, исчезающая после снятия нагрузки, называется упругой деформацией.

Если к детали приложить сравнительно большие усилия, то после прекращения действия этих сил деталь не примет своей первоначальной формы, а так и останется растянутой или изогнутой. Такая деформация называется пластической. Способность материала деформироваться под действием внешних усилий не разрушаясь и сохранять измененную форму после прекращения действия усилий называется пластичностью.

Пластичность материалов — весьма важное свойство. Пластичные материалы хорошо сопротивляются действию ударов, толчков, неизбежных при работе многих машин. Благодаря способности материала к пластической деформации мы можем его ковать, прокатывать, штамповать и т. д. Свойством, противоположным пластичности, является хрупкость. Материалы, не способные к пластическим деформациям, называются хрупкими. Такие материалы при сильном нагружении или под действием удара разрушаются внезапно, не изменяя своей формы. Хрупкими материалами являются стекло, камень, чугун, сильно закаленная твердая сталь и др. Наряду с упругостью и пластичностью, важным свойством

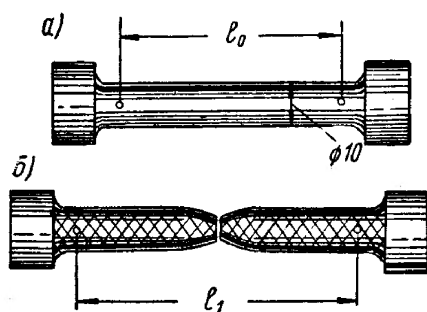


Рис. 1. Образец для испытания на растяжение:
а – до испытания; б – после разрыва.

материалов является прочность. Это свойство характеризуется максимальной нагрузкой, которую выдерживает образец не разрушаясь. Каждая деталь машины или инструмент должны обладать определенными механическими свойствами (прочностью, упругостью, пластичностью) в зависимости от условий их работы. Чтобы убедиться, что деталь удовлетворяет тем требованиям, которые к ней предъявляются, производят специальные испытания. Вид испытания и характер его проведения указываются в технических условиях или

на чертежах заготовки. Наиболее широкое распространение в практике находят следующие виды механических испытаний металлов: испытание на растяжение, испытание на удар и определение твердости.

Испытание на растяжение. Этот вид испытания очень распространен, так как позволяет наиболее полно определить различные свойства металлов: их упругость, пластичность и прочность. Для определения численных значений указанных свойств металла поступают следующим образом. Из испытываемого металла изготавливают образцы плоской (из листового материала) или круглой формы. Чаще всего применяют круглые образцы (рис. 1).

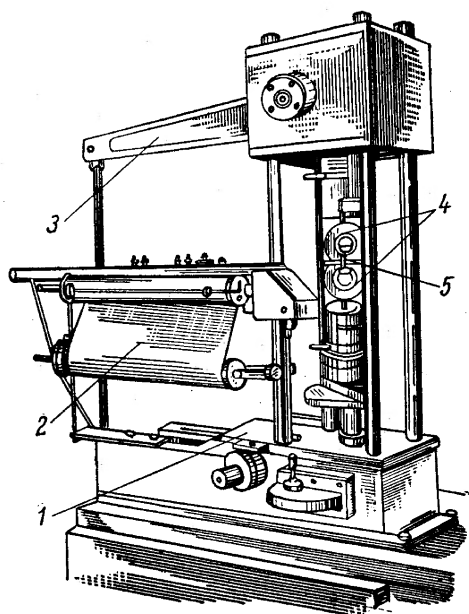


Рис. 2. Общий вид маятниковой машины для испытания на растяжение.

В этом образце наиболее важны два размера: диаметр и расчетная длина (l_0). Испытание на растяжение осуществляется на специальных разрывных машинах различных конструкций. Общий вид маятниковой машины для испытания на растяжение представлен на рис. 2. Образец 5 помещается в захваты 4. Нижний захват опускается с помощью механического привода, смонтированного в нижней части машины 1. Верхний захват связан с рычагом маятника 3. При растяжении образца маятник отклоняется и уравнивает силу, тянущую образец вниз. Угол отклонения маятника соответствует нагрузке, приложенной к образцу. Весь процесс растяжения образца, вплоть до его разрыва, регистрируется при помощи самозаписывающего прибора на миллиметровой бумаге 2.

В результате получается диаграмма растяжения (рис. 3). По оси абсцисс этой диаграммы в определенном масштабе отложено удлинение

образца (в миллиметрах), а по оси ординат — усилие, приложенное к образцу (в килограммах). Так как испытанию подвергаются образцы различной формы и размеров, то для получения сравнимых результатов введено понятие — *напряжение*. Напряжением называется нагрузка на единицу площади поперечного сечения образца. Напряжение обозначается греческой буквой σ . Если нагрузка P выражена в килограммах, а площадь поперечного сечения F в квадратных миллиметрах, то: $\sigma = P / F$ кг/мм².

Пользуясь записанной на машине диаграммой растяжения, можно определить важные характеристики механических свойств металлов. Начальная часть диаграммы растяжения представляет собой прямую линию. Этот участок диаграммы соответствует упругому удлинению образца. Это значит, что если бы мы растянули образец силой P_e или меньшей, а затем сняли ее, то никакого остаточного удлинения образец не получил бы. Следовательно, P_e — это максимальная нагрузка, которую выдерживает образец, не теряя своих упругих свойств. Если величину нагрузки P_e разделить на площадь поперечного сечения образца, то получим *предел упругости*. Таким образом, пределом упругости называют максимальное напряжение, до которого металл сохраняет свои упругие свойства. Предел упругости обозначают σ_e и выражают в килограммах на квадратный миллиметр (кг/мм²). Выше точки P_e величина удлинения начинает расти быстрее величины усилия, поэтому кривая диаграммы начинает изгибаться, склоняясь к горизонтальной линии. У некоторых материалов этот участок диаграммы имеет явно выраженную горизонтальную линию и называется площадкой текучести. При достижении нагрузки P_s образец начинает получать уже заметное остаточное удлинение, или, как говорят, металл «течет». У малоуглеродистых сталей наблюдается удлинение даже и без увеличения нагрузки. В этом случае на диаграмме образуется площадка текучести. Если величину нагрузки P_s разделим на площадь

поперечного сечения образца, то получим предел текучести. Следовательно, пределом текучести называется напряжение, при котором в металле начинает развиваться заметная пластическая деформация. Предел текучести обозначают σ_s и выражают в кг/мм^2 .

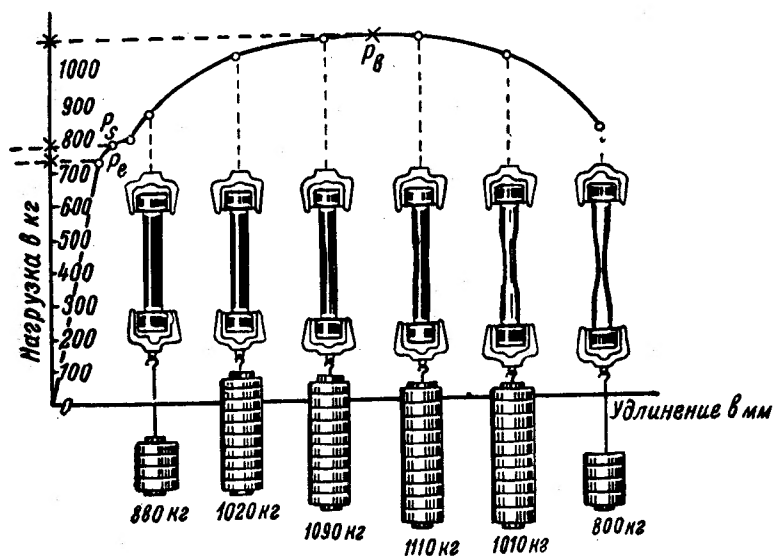


Рис. 3. Диаграмма растяжения стального образца.

Если на диаграмме растяжения нет явно выраженной площадки текучести, то пределом текучести условно считают то напряжение, при котором остаточное удлинение образца составляет 0,2% от его первоначальной длины. В этом случае предел текучести обозначают $\sigma_{0,2}$. Предел текучести также является численной характеристикой упругости металла, но менее точной, чем предел упругости. Несмотря на это, при расчете деталей машин на прочность конструктор чаще всего исходит из значения предела текучести. Это объясняется тем, что предел текучести определяется значительно проще, чем предел упругости, а численно они близки между собой. Лишь при расчете на

прочность деталей очень точных механизмов руководствуются значением предела упругости. При дальнейшем увеличении растягивающего усилия (выше значения предела текучести) образец будет всё больше удлиняться, а диаметр его уменьшаться (см. рис. 3). Когда усилие достигнет наибольшего значения, в образце начнет образовываться «шейка», т. е. в каком-то месте сечения образца диаметр его уменьшается больше, чем в других местах. Образец в шейке будет наиболее тонким, и в дальнейшем здесь и произойдет разрыв его на две части. Если наибольшую нагрузку P_b которую выдержал образец до разрыва, разделить на его первоначальную площадь поперечного сечения, то получим предел прочности. Таким образом, пределом прочности называется напряжение, отвечающее максимальной нагрузке, которую выдержал образец во время испытания. Предел прочности обозначается σ_b и выражается в кг/мм^2 . Предел прочности численно характеризует прочность металлов. Однако он не служит для конструкторов исходной характеристикой при расчете на прочность деталей машин и конструкций, так как при достижении предела прочности материал имеет уже значительные остаточные деформации. Например, когда по мосту проходит поезд, то мост под действием силы тяжести прогибается, но как только поезд прошел, мост должен выпрямиться. Если же усилия, действующие на мост, достигнут предела прочности, то после прохода поезда мост так и останется прогнувшимся. Несмотря на это, предел прочности записывается во многих стандартах и в большинстве технических условий на приемку деталей машин и конструкций, что объясняется следующими причинами:

1. Предел прочности характеризует качество материала. Если предел прочности получается меньше тех значений, которые установлены для данного материала, то это свидетельствует о том, что в материале имеются какие-то пороки (несоответствующий химический состав, неправильно проведена его термическая обработка и др.).
2. Определить предел прочности значительно проще, чем другие характеристики. Указанные выше характеристики (предел упругости, предел текучести и предел прочности) не дают представления о пластических свойствах металлов. Чтобы сделать вывод о том, является ли данный материал апатичным или хрупким, определяют его *относительное удлинение* и *относительное сужение*.

Для получения этих характеристик обе половинки разорванного образца складывают плотно вместе и измеряют длину его рабочей части (l_1) и диаметр образца в том месте, где произошел разрыв (d_1). Относительное удлинение обозначается греческой буквой δ и выражается в процентах. Его определяют по следующей формуле:

$$\delta = l_1 - l_0 / l_0 \times 100\%$$

где l_0 — первоначальная расчетная длина; l_1 — расчетная длина после испытания.

Пластичность при растяжении можно характеризовать также относительным сужением поперечного сечения образца, которое обозначается греческой буквой ψ и выражается в процентах. Относительное сужение определяется по формуле:

$$\psi = F_0 - F_1 / F_0 \times 100\%$$

где F_0 — площадь поперечного сечения образца до испытания; F_1 — площадь сечения образца в месте разрыва образца (в шейке).

Чем больше относительное удлинение и относительное сужение поперечного сечения образца, тем более пластичен металл. Так, например, мягкое железо при его растяжении до разрыва удлинится в 1,5 раза, у чугуна же относительное удлинение и относительное сужение близки к нулю. Для большинства деталей машин и конструкций применяют пластичные материалы, так как они не подвержены опасности внезапного разрушения. Таким образом, при испытании на растяжение одного образца можно определить следующие пять характеристик механических свойств металлов: предел упругости (σ_e), предел текучести (σ_s), предел прочности (σ_b), относительное удлинение (δ) и относительное сужение (ψ). Эти характеристики дают разностороннее представление о механических свойствах металлов.

Испытание на удар. Многие материалы в процессе работы подвергаются мгновенному действию сил в виде удара. Чтобы выяснить способность материала сопротивляться действию ударных сил, производятся специальные испытания на удар — определяют характеристику механических свойств, которая называется *ударной вязкостью*. Эта характеристика показывает, какую работу надо затратить, чтобы разрушить материал под действием ударных сил. Определение ударной вязкости производится так. Из материала, вязкость которого требуется определить, вырезается образец квадратной формы и точно посередине его делается неглубокий (2 мм) надрез (рис. 4), который необходим для того, чтобы излом прошел через середину образца.

Испытание осуществляется на специальном маятниковом копре, устройство которого

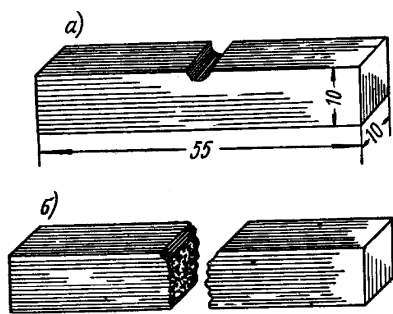


Рис. 4. Образец для испытания на удар:
а — до испытания; б — после испытания.

показано на рис. 5. Образец свободно, без зажима, укладывается на опоры копра (рис. 6). Тяжелый маятник копра поднимают на определенную высоту и предоставляют ему свободно падать. При падении маятник ударяет по образцу со стороны, противоположной надрезу (место удара указано на рис. 6 стрелкой), и образец разламывается пополам (см. рис. 4, б). Положение маятника в различные моменты испытаний показано на рис. 7: I — перед испытанием; II — об момент удара по образцу; III — после разрушения образца. Работа, затраченная на разрушение образца (A), учитывается довольно точно по углам

взлета маятника до испытания, (α_1) и после удара (α_2).

Работу, которую может совершить маятник (A_1), легко подсчитать, зная вес маятника и угол его взлета (α_1). Практически эту работу определять не приходится, так как мощность копра указана в паспорте машины. Обычно мощность копра превышает работу необходимую для разрушения образца. Поэтому после того как образец разрушен, маятник совершает еще взлет на определенный угол α_2 (положение III). Если известен угол взлета α_2 , то можно легко подсчитать работу A_2 , затраченную на взлет маятника после разрушения образца.

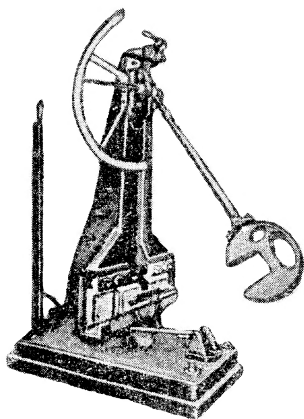


Рис. 5. Общий вид маятникового копра.

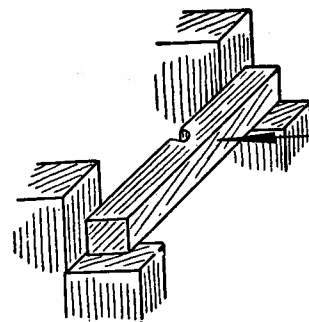


Рис. 6. Положение образца на опорах копра.

Рис. 5. Общий вид маятникового копра. Рис. 6. Положение образца на опорах копра.

Зная A_1 и A_2 , можно определить работу, идущую непосредственно на разрушение образца:

$$A = A_1 - A_2$$

Ударная вязкость обозначается a_k и выражается в килограммометрах на квадратный сантиметр (кгм/см^2). Определяется она по следующей формуле:

$$a_k = A / F \text{ кгм/см}^2,$$

где F — площадь поперечного сечения образца в месте надреза. У обычно применяемых стандартных образцов (см. рис. 4) $F = 0,8 \text{ см}^2$. Так как работа A_1 которую может совершить маятник, и площадь поперечного сечения образца

заранее известны, то при испытании на удар нужно лишь узнать угол взлета маятника при холостом ходе (α_2) и затем по заранее составленным для данного копра таблицам определить ударную вязкость.

Численное значение ударной вязкости для различных материалов колеблется в довольно широких пределах: у обычного серого чугуна $a_k = 0,2 \text{ кгм/см}^2$, а у сталей ударная вязкость достигает 20 кгм/см^2 и более. Наиболее трудоемкой задачей термической обработки является совмещение в материале одновременно высокой прочности и высокой ударной вязкости.

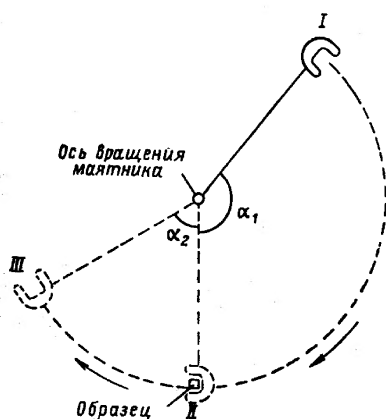


Рис 7. Положение маятника в различные моменты испытаний.

Определение твердости. Важной характеристикой механических свойств материалов является *твердость*. Твердостью называется способность материала сопротивляться проникновению в него другого, более твердого материала. Высокой твердостью должны

обладать металлорежущие инструменты: резцы, сверла, фрезы и т. п. Детали машин, как правило, должны иметь среднюю твердость, так как если они будут обладать большой твердостью, их будет трудно обрабатывать на станках, а если они будут мягкими, то на их поверхности будут образовываться вмятины, царапины и другие дефекты.

Твердость материалов определяется сравнительно просто и быстро. Для этого не нужно изготовлять сложные образцы, а в ряде случаев, возможно измерить твердость непосредственно на детали, благодаря чему определение твердости является самым распространенным видом механических испытаний материалов. В производственных условиях наиболее широко применяются два способа определения твердости, названные по имени их изобретателей: способ Бринелля и способ Роквелла.

Способ Бринелля. Определение твердости по способу Бринелля осуществляют на приборе, приведенном на рис. 8. На куске металла, твердость которого необходимо измерить,

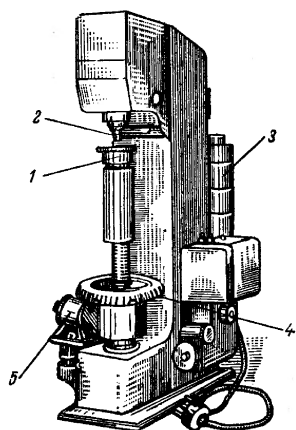


Рис. 8. Общий вид прибора Бринелля.

зачищают напильником или наждачным кругом небольшую площадку размером 3 – 5 см². На зачищенное место вдавливают при помощи пресса стальной шарик. Для стальных и чугунных образцов толщиной более 6 мм обычно применяют шарик диаметром 10 мм и нагрузку 3000 кг. Для более тонких образцов используют шарик диаметром 5 мм при нагрузке 750 кг. Испытание осуществляется следующим образом. Кусок металла или деталь ставят на столик 1 пресса и при помощи маховика 4 поднимают до соприкосновения с шариком 2, который укреплен в шпинделе пресса. При включении электродвигателя (моторчика) 5 груз 3 опускается и вдавливает стальной шарик в образец. На поверхности металла получается отпечаток, который называют лункой.

Чем больше эта лунка, тем мягче испытываемый материал. Для определения численного значения твердости при помощи лупы измеряют диаметр отпечатка (рис. 9), а затем по формуле вычисляют его поверхность. Разделив величину нагрузки (в кг) на площадь поверхности отпечатка (в мм²), получают число твердости по Бринеллю. Твердость по Бринеллю обозначается Н_В. Так как вычисление поверхности отпечатка является довольно кропотливой работой, то число твердости обычно определяется по измеренному диаметру отпечатка с помощью заранее составленных таблиц (табл. 1).

Таблица 1. Числа твердости по Бринеллю в зависимости от диаметра отпечатка

Диаметр отпечатка	Число твердости	Диаметр отпечатка	Число твердости	Диаметр отпечатка	Число твердости
2.00	946	3.30	340	4.60	170
2.05	898	3.35	332	4.65	166
2.10	857	3.40	321	4.70	163
2.15	817	3.45	311	4.75	159
2.20	782	3.50	302	4.80	156
2.25	744	3.55	293	4.85	153
2.30	713	3.60	286	4.90	149
2.35	683	3.65	277	4.95	146
2.40	652	3.70	269	5.00	143
2.45	627	3.75	262	5.05	140
2.50	600	3.80	255	5.10	137
2.55	578	3.85	248	5.15	134
2.60	555	3.90	241	5.20	131
2.65	532	3.95	235	5.25	128
2.70	512	4.00	228	5.30	126
2.75	495	4.05	223	5.35	124
2.80	477	4.10	217	5.40	121
2.85	460	4.15	214	5.45	118
2.90	444	4.20	207	5.50	116
2.95	430	4.25	202	5.55	114
3.00	418	4.30	196	5.60	112
3.05	402	4.35	192	5.65	109
3.10	387	4.40	187	5.70	107
3.15	375	4.45	183	5.75	105
3.20	364	4.50	179	5.80	103
3.25	351	4.55	174	5.85	101

Достоинствами способа Бринелля являются простота испытания точность получаемых результатов. Кроме того, у сталей существует определенная зависимость между числом твердости по Бринеллю и пределом прочности. Для обычных углеродистых сталей $\sigma_b = 0,35 H_B$.

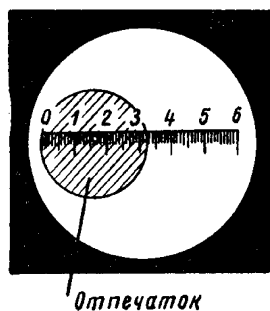


Рис. 9. Измерение диаметра отпечатка лупой с делениями.

Таим образом, зная твердость по Бринеллю, можно, не производя испытаний на растяжение, указать примерное значение предела прочности. Этим часто пользуются для проверки результатов термической обработки материала. Определение твердости по способу Бринелля имеет и некоторые недостатки. Этим способом нельзя измерить твердость материалов, у которых значение H_B более 400 (закаленная сталь, белый чугун и др.), так как стальной закаленный шарик может деформироваться и, следовательно, будут получены неправильные результаты. Необходимо также иметь в виду, что при измерении твердости по способу Бринелля на поверхности испытываемого материала получается сравнительно большой отпечаток ($d = 3$ — 6 мм), поэтому готовые детали часто не могут подвергаться такому испытанию. Способом Бринелля нельзя измерить также твердость тонких изделий.

Способ Роквелла. Этим способом твердость определяют по глубине вдавливания наконечника специального прибора (рис. 10) в поверхность испытываемого металла. Наконечник снабжен алмазным конусом с углом при вершине 120° или маленьким стальным шариком. При вдавливании наконечника в поверхность металла приводится в действие стрелка имеющегося на приборе индикатора, и на циферблате указывается число твердости в условных единицах.

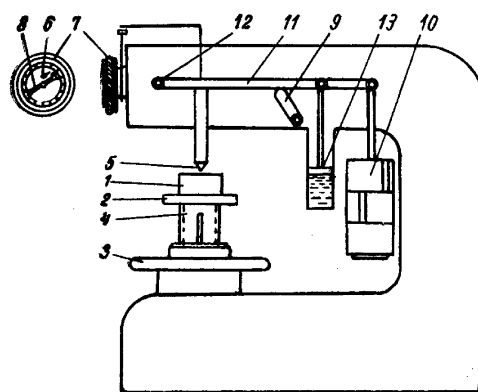


Рис. 10. Схема прибора Роквелла.

Испытываемая деталь 1 с небольшой зачищенной площадкой устанавливается на столике прибора 2. При помощи штурвала 3 винт 4 поднимают вверх до соприкосновения алмаза 5 с зачищенной площадкой детали. После этого штурвал вращают очень медленно и осторожно до тех пор, пока маленькая стрелка 6 на циферблате индикатора 7 не станет против отметки в виде точки. При этом положении алмаз вдавливается в образец с нагрузкой в 10 кг. Предварительная нагрузка в 10 кг дается для того, чтобы устранить неточности получаемых результатов ввиду неодинакового состояния поверхности испытываемых деталей. Затем циферблат индикатора перемещают так, чтобы большая стрелка 8 оказалась против нулевого деления шкалы, и поворачивают рукоятку 9. Грузы с помощью рычага 11, имеющего неподвижную опору 12, начинают давить на алмаз и он вдавливается в испытываемую деталь с силой в 150 кг. Нагрузка на алмаз должна производиться медленно и постепенно (иначе он выкрошится), в течение 3 сек. Это достигается автоматически при помощи масляного тормоза 13, который регулирует скорость опускания рычага 11. Когда рычаг полностью опустится, рукоятку 9 возвращают в первоначальное положение, и нагрузка снимается.

Числовое значение твердости указывается (в условных единицах) стрелкой на черной шкале циферблата индикатора (эта шкала обозначается буквой С). После окончания испытания при помощи штурвала винт перемещают вниз, опуская этим самым столик с деталью. При испытании тонких образцов или при определении твердости поверхностного слоя металла алмаз вдавливается с силой в 60 кг. Твердость отожженных сталей и других мягких материалов измеряется на приборе Роквелла путем вдавливания шарика диаметром 1,59 мм под нагрузкой 100 кг. Испытание осуществляется аналогично описанному выше, но число

твердости определяется по красной шкале циферблата индикатора (эта шкала обозначается буквой В). Глубина вдавливания при испытании по способу Роквелла очень невелика, и на поверхности изделия остается незначительный след. Это является большим преимуществом данного способа. Твердость по Роквеллу обозначается H_R . Кроме того, внизу ставится буква С, если испытание производилось алмазом при нагрузке 150 кг (H_{RC}); буква В, если испытание производилось шариком при нагрузке 100 кг (H_{RB}), и буква А, если испытание производилось алмазом при нагрузке 60 кг (H_{RA}). Числа твердости по Роквеллу могут быть переведены в числа твердости по Бринеллю, и наоборот. Для этой цели имеются специальные таблицы (табл. 2).

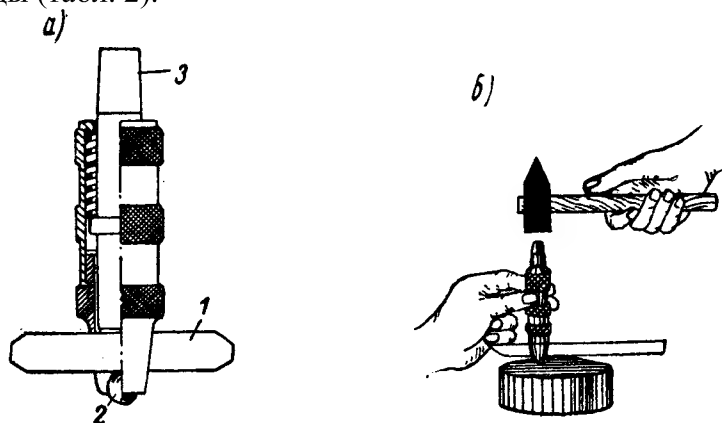


Рис. 11. Прибор Польди для определения твердости:
а – схема прибора; б – метод испытания.

Этот прибор дает возможность определить твердость по Бринеллю упрощенным способом. Испытание ведется так. Прямоугольный стержень 1 (эталон), твердость которого известна, вставляют в прибор между шариком 2 (диаметр шарика 10 мм.) и нижним концом пуансона 3. Затем прибор ставят на испытываемый образец и по выступающей части пуансона сильно ударяют молотком (рис. 11, б). Удар должен быть центральным. В результате удара на поверхности эталона и образца появляются отпечатки шарика. Диаметры отпечатков измеряются с точностью до 0,1 мм лупой с масштабной линейкой, приложенной к прибору, и по имеющейся таблице определяют число твердости по Бринеллю. Ошибки показаний прибора Польди обычно составляют 3 – 7%.

Таблица 2. Сравнение твердости по Бринеллю и Роквеллу.

Твердость по Бринеллю.	Твердость по Роквеллу (алмазный конус, нагрузка 150 кг.)	Твердость по Роквеллу (шарик, нагрузка 100 кг.)
782	72	—
744	69	—
713	67	—
683	65	—
665	64	—
650	63	—
635	62	—
621	61	—
607	60	—
594	59	—
581	58	—
568	57	—
555	56	—
532	54	—
512	52	—
495	51	—
477	49	—
460	48	—
444	47	—
430	45	—
418	44	—
402	43	—
387	41	—
375	40	—
364	39	—
351	38	—
340	37	—
321	35	—
302	33	—
286	30	—
269	28	—
255	26	—
241	24	100
228	22	98
217	20	97
207	18	95
196	—	93
187	—	91
179	—	88
170	—	86
166	—	85
163	—	84
159	—	83
156	—	82
153	—	81
149	—	80
146	—	78
143	—	76
135	—	74
127	—	71
119	—	67
110	—	62
100	—	55
90	—	48
80	—	40

Глава II. СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ. КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ.

Свойства металлов и сплавов в основном определяются их внутренним строением, или структурой. Поэтому, чтобы разумно управлять свойствами металлов и изменять их в желательном для нас направлении, необходимо знать их строение. Все тела состоят из огромного количества атомов, отделенных друг от друга промежутками ничем не занятого пространства. Атомы удерживаются на месте силами взаимного притяжения и отталкивания (силами сцепления). Различие в свойствах металлов, прежде всего, обуславливается природой атомов. Атомы железа не сходны с атомами алюминия или атомами меди, поэтому каждый металл имеет свои индивидуальные свойства. Но не только природой атомов определяются свойства металлов. Они зависят еще и от того, как между собой связаны атомы: какое расстояние между ними, каков порядок их расположения. Если изменить расстояние между атомами или порядок их расположения, то и свойства металла изменятся. В твердых телах атомы могут располагаться либо беспорядочно, либо в определенном порядке. В зависимости от этого различают тела аморфные и кристаллические. У аморфных тел атомы располагаются в пространстве беспорядочно. Наиболее типичное аморфное вещество – стекло. У кристаллических тел атомы размещаются в строго геометрически правильном порядке. Большинство твердых тел, в том числе все металлы и их сплавы, является телами кристаллическими. Порядок расположения атомов у различных металлов неодинаков. Обычно он характеризуется *пространственной*, или *кристаллической* решеткой. Такая решетка получается, если представить атомы в виде шариков и соединить их друг с другом, как это показано на рис. 12.

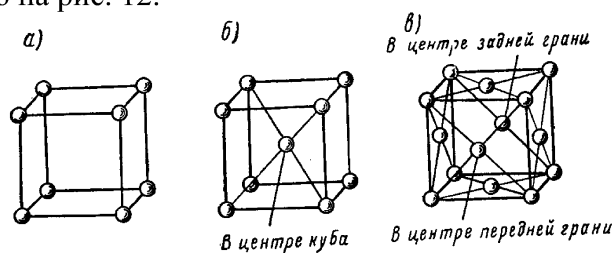


Рис. 12. Элементарные ячейки кристаллической решетки:
а – простой куб; б – центрированный куб; в – куб с центрированными гранями.

Следует иметь в виду, что такое изображение кристаллической решетки является условным и используется лишь для большей наглядности. В действительности никаких линий между атомами в кристаллическом теле нет, — атомы почти соприкасаются друг с другом. Кроме того, атомы не находятся в покое, а испытывают непрерывные колебания. При нагреве тела колебание атомов возрастает, а при температуре плавления оно становится настолько большим, что атомы значительно удаляются друг от друга, связь их слабеет, и решетка разрушается. Большинство важнейших металлов имеет простые кристаллические решетки. Хром, вольфрам, молибден и некоторые другие металлы имеют кристаллическую решетку центрированного куба, элементарная ячейка которой приведена на рис. 12, б. Элементарная ячейка изображает только один элемент или одну ячейку кристаллической решетки, а вся решетка в целом состоит из большого количества многократно повторяющихся элементарных ячеек. Элементарная ячейка центрированного куба имеет 9 атомов; 8 из них расположены по углам куба, а один – в центре.

Такие металлы, как медь, алюминий, никель, имеют кристаллическую решетку куба с центрированными гранями, элементарная ячейка которой представлена на рис. 12 в. Приведенная элементарная ячейка состоит из 14 атомов; 8 из них расположены по углам куба и 6 — в центре каждой из его шести граней; в центре куба атома нет. Железо может иметь и тот и другой тип кристаллической решетки. Встречаются и другие типы кристаллических решеток.

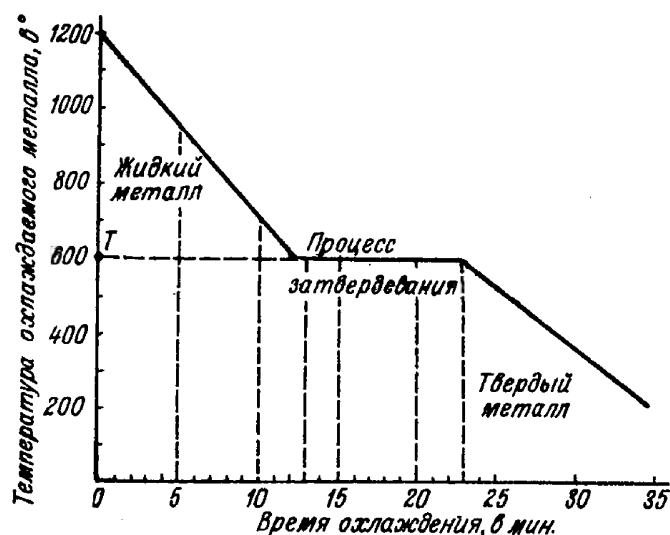


Рис. 13. Кривая охлаждения чистого металла

Свойства металлов зависят не только от типа решетки, но и от расстояния между атомами в ней. Это расстояние, как и другие размеры кристаллической решетки, измеряется в *ангстремах*. Ангстрем — это одна десятиmillionная часть миллиметра. У большинства металлов расстояние между атомами колеблется в пределах от 2,8 до 6 ангстрем. Расстояние между атомами железа при комнатной температуре равно 286 миллиардным долям миллиметра. Ввиду того, что атомы представляют собой мельчайшие частицы (например, на отрезке длиной в 1 см можно разместить в один ряд 33

миллиона атомов железа), увидеть их или хотя бы кристаллическую решетку в целом невозможно даже при помощи самых сильных микроскопов. Тип кристаллической решетки и расстояние между атомами могут быть установлены лишь с помощью рентгеновых лучей.

МЕХАНИЗМ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ.

Любой кусок металла состоит из огромного количества кристаллов, плотно примыкающих друг к другу. На свойства металлов влияют не только порядок расположения атомов внутри кристалла, но и форма отдельных кристаллов, их размеры и направление. Эти факторы оказывают особенно большое влияние на механические свойства металлов.

Если порядок расположения атомов (тип кристаллической решетки) является природным свойством металла, то форма кристаллов и их размеры определяются процессом перехода металла из жидкого состояния в твердое. Так как образование кристаллов происходит при затвердевании металла, то этот процесс называют *кристаллизацией*. Управляя процессом кристаллизации, можно получить кристалл желаемой формы и размеров. Жидкий металл отличается от твердого тем, что атомы в нем расположены беспорядочно и легко смещаются относительно друг друга, вследствие чего жидкость течет. В твердом металле атомы располагаются в правильном порядке, образуя кристаллические решетки, где атомы оказываются уже крепко связанными друг с другом. Чтобы разрушить такую решетку, надо приложить внешние усилия.

Процесс образования кристаллов сопровождается выделением тепла, и, наоборот, переход металла из твердого состояния в жидкое сопровождается поглощением тепла. Эти явления можно наблюдать, если через определенные промежутки времени (10 – 20 сек.) измерять температуру жидкого металла. При охлаждении жидкого металла температура вначале будет падать равномерно. Когда же начнется образование кристаллов, то вследствие выделения скрытой теплоты при формировании кристаллической решетки падение температуры прекратится, и она останется неизменной до полного затвердевания металла. После того как весь металл затвердеет, температура снова начнет понижаться. Это изменение температуры во времени можно выразить графически, откладывая в определенном масштабе по горизонтальной оси время, а по вертикальной оси — температуру, при этом получится кривая охлаждения металла. Температура, соответствующая горизонтальному участку кривой охлаждения, и будет температурой затвердевания данного металла. Ее называют критической температурой. Кривая охлаждения чистого металла приведена на рис. 13. Механизм процесса кристаллизации изучался многими учеными. На основании многолетних

исследований литой стали Д. К. Чернов еще в 1878 г. указывал, что процесс кристаллизации металлов подобен кристаллизации солей и состоит из двух элементарных процессов, которые протекают одновременно. Первый процесс заключается в образовании центров кристаллизации, или зародышей кристаллов (Д. К. Чернов называл их зачатками), второй процесс – в росте кристаллов из этих центров. Последовательные этапы процесса кристаллизации схематично показаны на рис. 14. Первый этап (рис. 14, а) – появление зародышей кристаллов. При дальнейшем остывании металла к этим зародышам присоединяются всё новые атомы, которые группируются в определенном порядке один возле другого (рис. 14, б и в) образуя элементарные ячейки кристаллической решетки (элементарная ячейка изображена в виде квадратика). Этот процесс продолжается до тех пор, пока выросшие кристаллы не заполнят весь объем металла (рис. 14, г).

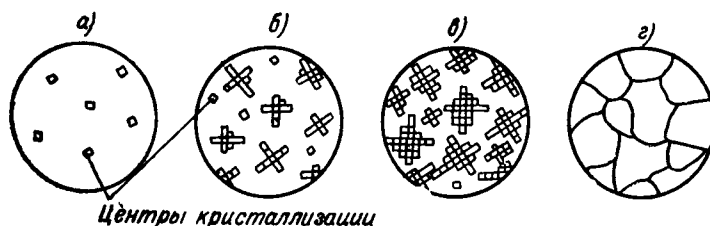


Рис.14. Последовательные этапы процесса кристаллизации (схема)

Как видно из представленной схемы, кристаллы затвердевшего металла имеют неправильную и весьма разнообразную внешнюю форму. Это объясняется условиями кристаллизации.

В процессе кристаллизации одновременно растет много кристаллов. В 1 см³ может образоваться до 1000 и более кристаллов. И вот наступает такой момент, когда грани смежных кристаллов соприкасаются. В точках соприкосновения рост кристаллов прекращается. Поэтому, несмотря на правильное внутреннее строение кристаллов, они имеют самую разнообразную внешнюю форму, в зависимости от числа соседних кристаллов и направления их роста. Кристаллы, имеющие неправильную внешнюю форму, называются кристаллитами, или зёрнами. Величина зёрен зависит от условий кристаллизации и, прежде всего, от скорости охлаждения металла. Чем больше скорость охлаждения металла, тем быстрее он затвердевает, тем больше возникает центров кристаллизации и тем, следовательно, меньше получаются размеры зёрна. Влияние скорости охлаждения на величину зёрна схематично представлено на рис. 15. В литом металле наблюдаются крупные зёрна, а в ковном они значительно меньше. После термической обработки металла они могут быть еще более мелкими.

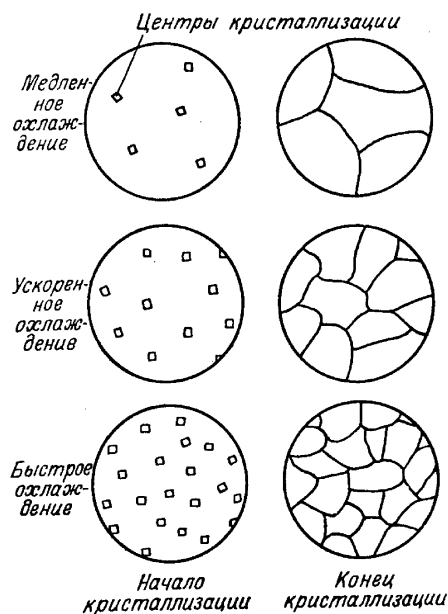


Рис. 15. Влияние скорости охлаждения на величину зёрна.

АЛЛОТРОПИЧЕСКИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ МЕТАЛЛОВ.

Мы привыкли смотреть на твердое тело как на что – то неизменяемое. В действительности, это не так. Некоторые металлы, будучи уже в твердом состоянии, могут претерпевать при определенных температурах изменения в своем строении. Изменения, которые происходят в строении металла, находящегося в твердом состоянии, называются аллотропическими превращениями. Сущность этих превращений заключается в том, что у некоторых металлов (железо, олово, титан и др.) при определенной температуре наблюдается перестройка атомов из одного типа кристаллической решетки в другой. Способность металла при одном и том же химическом составе иметь различное строение, а следовательно и свойства, носит название *полиморфизма* (многообразие). Различные структурные формы одного и того же металла называются его модификациями. Они обозначаются буквами греческого алфавита. Модификация, существующая при наиболее низкой температуре, обозначается буквой α , при повышенной β , при еще более высокой γ и затем δ . Из курса химии известно много примеров аллотропических превращений в простых телах (белый и красный фосфор, несколько форм серы, углерод в виде алмаза и графита и др.). Превращения, протекающие в твердых металлах, также сопровождаются поглощением или выделением тепла, как и при процессе кристаллизации, поэтому на кривых охлаждения наблюдаются небольшие горизонтальные площадки. Температуры, соответствующие этим площадкам, называются *критическими*. Кривая охлаждения олова приведена на рис. 16. Верхняя горизонтальная площадка соответствует температуре кристаллизации, а нижняя – аллотропическому превращению.

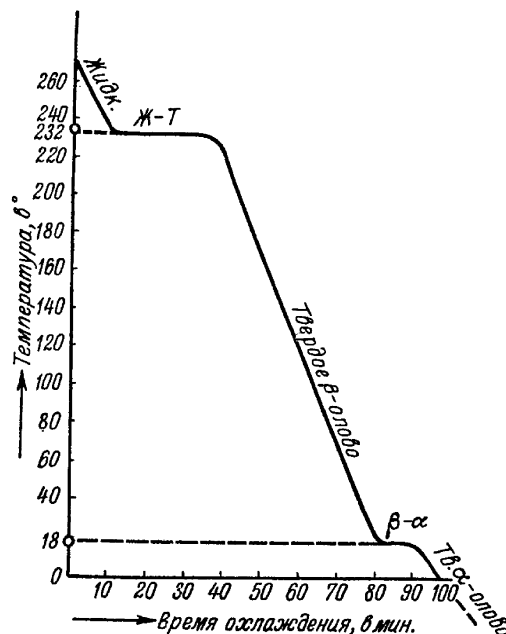


Рис. 16. Кривая охлаждения олова.

Понятно, что перестройка кристаллической решетки вызывает изменение свойств металла. Весьма показательным в этом отношении является олово. Мягкое и пластичное белое олово ($\text{Sn}\beta$) на сильном морозе испытывает аллотропическое превращение и переходит в другую модификацию ($\text{Sn}\alpha$), при которой оно приобретает серый цвет, теряет свою пластичность и легко рассыпается в порошок. Аллотропические превращения в железе оказывают значительное влияние на его свойства, но внешний вид железа не изменяют. Более подробно аллотропические превращения железа будут рассмотрены в гл. IV. Аллотропические превращения можно искусственно затормозить или вовсе не допустить путем быстрого охлаждения металла или добавкой в него других элементов. Практическое значение аллотропических превращений металла очень велико, в частности с ними связано большинство видов термической обработки стали. Процесс образования кристаллов из жидкого металла называют *первичной кристаллизацией*. Превращения, протекающие в твердом металле, называют *вторичной кристаллизацией*. При термической обработке происходят процессы вторичной кристаллизации.

Понятно, что перестройка кристаллической решетки вызывает изменение свойств металла. Весьма показательным в этом отношении является олово. Мягкое и пластичное белое олово ($\text{Sn}\beta$) на сильном морозе испытывает аллотропическое превращение и переходит в другую модификацию ($\text{Sn}\alpha$), при которой оно приобретает серый цвет, теряет свою пластичность и легко рассыпается в порошок. Аллотропические превращения в железе оказывают значительное влияние на его свойства, но внешний вид железа не изменяют. Более подробно аллотропические превращения железа будут рассмотрены в гл. IV. Аллотропические превращения можно искусственно затормозить или вовсе не допустить путем быстрого охлаждения металла или добавкой в него других элементов. Практическое значение аллотропических превращений металла очень велико, в частности с ними связано большинство видов термической обработки стали. Процесс образования кристаллов из жидкого металла называют *первичной кристаллизацией*. Превращения, протекающие в твердом металле, называют *вторичной кристаллизацией*. При термической обработке происходят процессы вторичной кристаллизации.

СПОСОБЫ ИЗУЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ.

Существует много разнообразных способов, при помощи которых изучают структуру металлов. Эти способы могут быть разделены на две группы. К первой группе относятся

способы изучения внутреннего строения кристаллов, ко второй – внешних форм кристаллов. Как было указано выше, внутреннее строение кристаллов, т. е. расположение атомов в кристаллической решетке, изучается при помощи рентгеновых лучей. Изучение размеров кристаллов, их формы и взаимного расположения может производиться различными способами. Наиболее простой из них – рассмотрение изломов металла. Этим способом человечество пользовалось в течение многих сотен лет. Он находит применение и в настоящее время.

Достоинствами этого способа являются быстрота, а также то, что он не требует каких – либо приборов. По излому можно судить, имеет металл крупно – или мелкозернистое строение, можно также отличить закаленную сталь от отожженной. Однако никаких числовых выводов о структуре металлов по виду излома сделать нельзя. Кроме того, определять структуру металла по излому может только человек с большим опытом. В настоящее время для изучения структуры металлов пользуются более совершенными и точными способами, к числу которых относятся макро – и микроисследования (макро в переводе с греческого – большой, микро – малый).

Макроисследование. Макроисследование металла производится на специальном образце, называемом макрошлифом. Для этого от исследуемой детали отрезают пластинку так, чтобы в нее попала большая часть поперечного сечения детали. Образец протрагивают на станке и затем шлифуют наждачной бумагой (начиная с самой грубой и кончая наиболее тонкой). В результате получается гладкая блестящая поверхность, которая и называется макрошлифом. Если эту поверхность протравить специальными кислотами (реактивами), то можно увидеть макроструктуру металла. *Макроструктурой* называют такую структуру, которая наблюдается невооруженным глазом или при небольшом увеличении (в 10 – 20 раз).

При рассмотрении макроструктуры металла можно выявить трещины, пузыри, шлаковые включения, неравномерное распределение серы и фосфора. По макрошлифу можно установить правильность направления волокон в ковном, прокатанном или штампованном металле (рис. 17). Макроанализ не позволяет делать количественных заключений о структуре металла.

Микроисследование. Исследование структуры металла при больших увеличениях с помощью металлографического микроскопа называется *микроисследованием*. Микроскоп изобретен очень давно, но для изучения структуры металлов он стал применяться лишь в прошлом столетии. Первым в мире использовал микроскоп для изучения структуры металлов русский инженер –металлург П. П. Аносов. Современные оптические микроскопы позволяют обнаруживать частицы размером до 0,2 мк при максимально возможном увеличении до 2000 раз. При изучении структуры стали и чугуна чаще всего применяют увеличение в 100 – 500 раз. Для проведения микроисследования готовят шлиф. От исследуемой детали отрезают небольшой кусочек металла, одну сторону его подвергают грубой обдирке на наждачном круге и шлифуют наждачной бумагой различных номеров, а затем полируют на быстро вращающемся круге полировального станка (на круг натянуто сукно, которое периодически смачивается водой в смеси с порошком окиси глинозема, хрома и т. п.). Полировку ведут до тех пор, пока не исчезнут риски от наждачной бумаги и

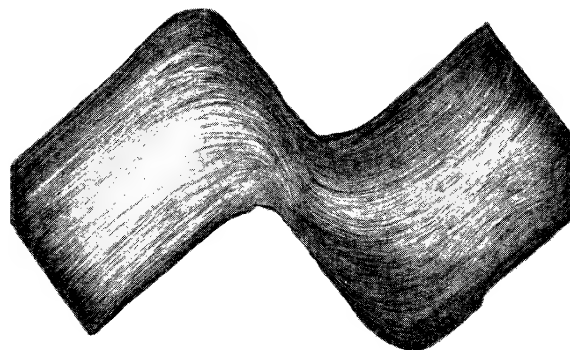


Рис. 17. Макроструктура ковальной стали.

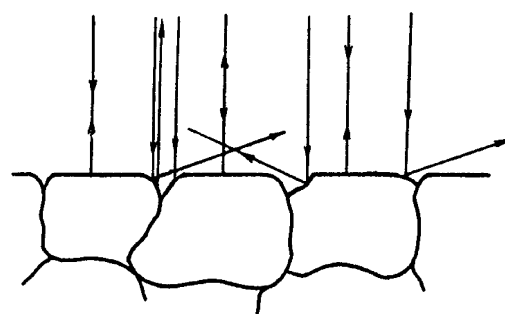


Рис. 18. Схема отражения лучей от зерна и его границ.

плоскость не получит зеркальный блеск. Такая полированная плоскость представляет собой *микрошлиф*. Для выявления структуры микрошлиф промывают спиртом и подвергают травлению различными реактивами. При изучении структуры стали в качестве реактива в большинстве случаев применяют 2 – 4% раствор азотной кислоты в этиловом спирте. Вследствие неодинаковой твердости составляющих структуры некоторые из них, как более

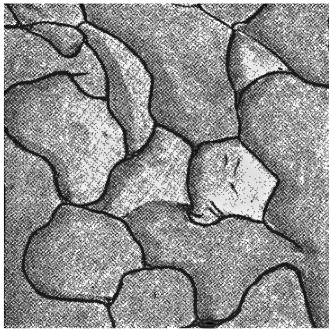


Рис. 19. Микроструктура железа ($\times 300$)

мягкие, при шлифовке и полировке вырабатываются сильнее и глубже, а твердые выступают, образуя рельеф. При травлении кислота в первую очередь будет воздействовать на границы тех зерен, которые в шлифе будут углублениями. Свет, падая на них, рассеивается, и они будут казаться темными, а само зерно светлым. Схема отражения лучей от зерна и его границ представлена на рис. 18. Микроструктура железа при увеличении в 300 раз показана на рис. 19. На ней видны светлые участки, которые являются зернами железа, и темные линии, представляющие собой границы зерен. Общий вид современного металлографического микроскопа МИМ – 6 (а) и его оптическая схема (б) показаны на рис. 20. Микрошлиф устанавливается на предметный столик 5. Источником света является лампа 1, которая питается током от сети через трансформатор 9. Световые лучи от лампы проходят через линзу 2, светофильтры и диафрагму 4 и падают на полуматовую пластинку, расположенную в верхней части микроскопа. Отразившись от пластинки, лучи света проходят через объектив (линза, расположенная под отверстием предметного столика) и освещают микрошлиф. Отразившись от микрошлифа световые лучи снова проходят через объектив и пластинку, преломляются в призме и через окуляр 3 попадают в поле зрения наблюдателя. При фотографировании микрошлифа лучи света от него направляются на фотопластинку 8. Регулирование фокуса микроскопа достигается подъемом или опусканием предметного столика 5. Для этой цели имеются винт 6 (для более точного регулирования) и винт 7 (для грубого регулирования).

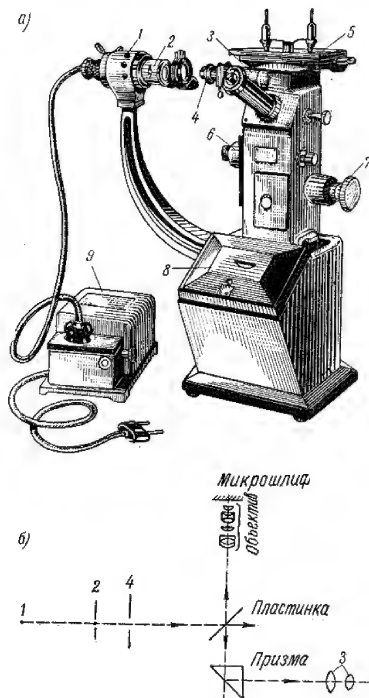


Рис. 20. Общий вид металлографического микроскопа МИМ – 6 (а) и его оптическая схема (б)

Необходимое увеличение достигается путем подбора соответствующих объектива и окуляра. Структура, наблюдаемая под микроскопом, называется микроструктурой.

Если микроструктура фотографируется, то получается микрофотография. На каждой микрофотографии должно обязательно указываться увеличение (например, $\times 100$, $\times 300$, т. е. увеличено в 100, в 300 раз). Для получения общего представления о микроструктуре следует пользоваться сравнительно небольшими увеличениями (в 100 – 200 раз), чтобы в поле зрения попала как можно большая поверхность шлифа.

Детальное изучение отдельных участков шлифа производится при больших увеличениях (в

500 раз и более). Следует иметь в виду, что площадь нормального шлифа равна примерно 1 см^2 и при увеличении в 1000 раз в поле зрения поместится площадка шлифа в 20 мк^2 , что составит $\frac{1}{50000}$ площади шлифа. Такой небольшой участок не дает общего представления о структуре исследуемого шлифа. В последнее время для изучения структуры металлов начали применять электронный микроскоп, увеличивающий в 10 – 20 тысяч раз и более. Этот микроскоп используется для научных исследований. В обычных заводских условиях применяются оптические металлографические микроскопы. Исследование микроструктуры позволяет изучить ряд важных особенностей строения металлов:

- 1) определить величину и форму зерен;
- 2) безошибочно установить, подвергался ли материал термической обработке, и даже определить качество этой обработки;
- 3) выявить такие дефекты, как обезуглероживание, пережог, перегрев, наличие неметаллических включений и т. п.;
- 4) если исследуется чугун, определить его сорт. Совершенно очевидно, что микроисследование – ценный способ исследования металлов. Каждый термист должен владеть этим способом и чаще им пользоваться для проверки результатов своей работы. Микроскоп должен стать подлинным другом и помощником термиста.

Глава III. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ СПЛАВОВ.

В гл. II было рассмотрено строение чистых металлов. Следует, однако, отметить, что чистые металлы сравнительно редко применяют в технике: они дороги, не обеспечивают требуемых механических, а в ряде случаев и физических свойств. Чистые металлы не обладают большой твердостью и высокой прочностью, а также большим электросопротивлением. Они имеют сравнительно высокий коэффициент линейного расширения, а также быстро понижают свою прочность и твердость при нагреве. Наиболее широкое применение в технике имеют сплавы, которые представляют собой сложные металлические тела, полученные путем сплавления двух или более простых элементов. Сплавы могут быть сочетанием различных металлов, а также металлов с неметаллами (например, сплав железа с углеродом). Элементы, из которых составлен сплав, называются компонентами. Сплав, состоящий из двух элементов (компонентов), называется двойным сплавом, из трех – тройным и т. д. Мы рассмотрим двойные сплавы, как наиболее простые.

СТРОЕНИЕ СПЛАВОВ.

Чтобы разобраться в свойствах сплавов, следует, прежде всего, рассмотреть их строение. Естественно, что строение сплава является более сложным, чем строение чистого металла. В жидком состоянии большинство сплавов представляет собой растворы одного компонента в другом, т. е. атомы одного элемента располагаются между атомами другого. Жидкий сплав — это однородная жидкость, в которой отдельные компоненты, составляющие сплав, не различаются (такой же раствор, каким являются растворы соли или сахара в воде). Во что же превращаются эти жидкие растворы при затвердевании? Оказывается, что в твердом состоянии сплавы могут иметь различное строение. В зависимости от вида компонентов, составляющих сплав, при его затвердевании могут образоваться механическая смесь, твердый раствор или химическое соединение. Свойства сплавов и зависят главным образом от вида взаимодействия компонентов при затвердевании, т. е. будут ли они в затвердевшем сплаве образовывать механическую смесь, твердый раствор или химическое соединение. Рассмотрим природу структурных составляющих сплавов.

Механическая смесь – это такая структурная составляющая сплава, когда кристаллы одного компонента расположены между кристаллами другого и могут быть различимы при рассмотрении под микроскопом. Такая структура образуется в тех случаях, когда происходит

раздельное выделение обоих компонентов из жидкого раствора, т. е. каждый компонент затвердевает сам по себе, сохраняя свойственную ему кристаллическую решетку. Схема микроструктуры механической смеси сплава, состоящего из двух компонентов (А и В), показана на рис. 21.

Твердый раствор. Если при переходе сплава из жидкого состояния в твердое компоненты, составляющие сплав, не отделяются друг от друга, как это имеет место при образовании механической смеси, а продолжают оставаться в растворе, то получается структура, которая называется твердым раствором.

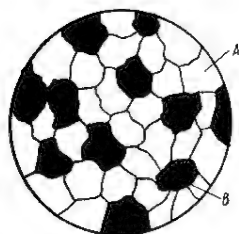


Рис. 21. Схема микроструктуры механической смеси.

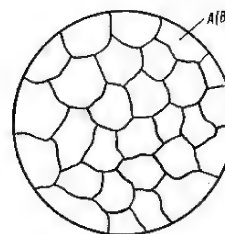


Рис. 22. Схема микроструктуры твердого раствора

Твердый раствор только тем и отличается от жидкого, что атомы в нем расположены с известной геометрически правильной закономерностью в виде кристаллических решеток. Таким образом, твердым раствором называют такой вид взаимодействия между компонентами, образующими сплав, когда атомы одного компонента располагаются в кристаллической решетке другого, т. е. в процессе кристаллизации образуется общая кристаллическая решетка, в которой находятся атомы обоих компонентов. Очевидно, что если такой сплав рассматривать под микроскопом, то мы увидим однородные кристаллы твердого раствора; компоненты же, составляющие сплав, под микроскопом не будут различимы. Схема микроструктуры твердого раствора представлена на рис. 22. При образовании твердого раствора один компонент является растворителем, а другой – растворимым. Растворителем становится тот компонент, кристаллическая решетка которого сохраняется, а растворимым – тот, атомы которого располагаются в кристаллической решетке растворителя. Кристаллическая решетка твердого раствора сплава меди с никелем приведена на рис. 23. Светлые шарики обозначают атомы меди, а черные – атомы никеля. Различают твердые растворы ограниченные и неограниченные. Так, например, железо с углеродом образует ограниченный твердый раствор, так как в кристаллической решетке железа может раствориться не более 2% углерода. Медь с никелем образуют неограниченные твердые растворы. Твердые растворы не отличаются постоянным составом. Например, могут встречаться твердые растворы железа с углеродом, содержащие 0,1, 0,5, 1,5% углерода и т. д.

Химическое соединение. У некоторых сплавов компоненты при затвердевании образуют химические соединения. Так, например, железо с углеродом образует химическое соединение Fe_3C , или карбид железа, медь и магний – Cu_2Mg . Химическое соединение, так же как и твердый раствор, имеет однородную структуру, а кристаллическая решетка соединения включает в себя атомы обоих компонентов. Но между химическим соединением и твердым раствором имеется существенная разница. В кристаллической решетке химического соединения атомы каждого компонента находятся в строго определенном числе и расположены всегда одинаково. Так, например, в химическом соединении Fe_3C три атома железа приходится на один атом углерода, а в соединении Cu_2Mg два атома меди приходится на один атом магния. Следовательно, химическое соединение имеет постоянный состав, который может быть выражен химической формулой. Состав твердых растворов может изменяться в широких пределах и не может быть выражен химической формулой. Химическое соединение имеет свою кристаллическую решетку определенного вида, которая отличается от кристаллических решеток элементов соединения, поэтому при образовании

сплавов химическое соединение рассматривают как самостоятельный элемент. Химическое

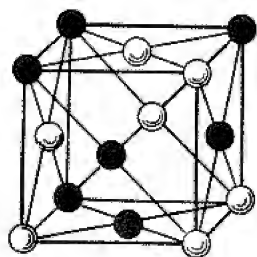


Рис. 23. Кристаллическая решетка твердого раствора меди с никелем.

соединение имеет свою кристаллическую решетку определенного вида, которая отличается от кристаллических решеток элементов соединения, поэтому при образовании сплавов химическое соединение рассматривают как самостоятельный элемент. Так, например, сталь представляет собой сплав, где одним из компонентов является железо, а вторым – химическое соединение Fe_3C (цементит). Таким образом, структура сплавов может представлять собой механическую смесь, твердый раствор или химическое соединение, которые

называются *структурными составляющими*. Структуры некоторых сплавов состоят из одной структурной составляющей, у других же могут одновременно сосуществовать все три указанные структурные составляющие.

ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ.

Большинство металлов может образовывать сплавы друг с другом, а также и с неметаллами. Количество различных сплавов, которые могут быть образованы какими – либо двумя элементами, довольно велико. Например, можно получить 99 различных сплавов свинца с сурьмой, если непрерывно увеличивать содержание сурьмы на 1 %. В технике находит применение огромное количество различных сплавов. Изучение всех существующих сплавов и запоминание их свойств является очень трудной и громоздкой работой. Эту задачу удалось значительно облегчить путем построения диаграмм состояния сплавов. Диаграммы состояния сплавов наглядно изображают превращения, протекающие в сплавах в зависимости от их химического состава и температуры; они освобождают нас от запоминания огромного количества цифр. При построении диаграммы состояния сплавов на оси абсцисс указывают химический состав или концентрацию сплава в процентах. Для этого горизонтальную линию определенной длины делят на 100 одинаковых частей и каждое деление принимают за один процент одного из компонентов сплава (рис. 24). Если линия АВ относится к сплавам свинца с сурьмой, то каждая точка, показывая процент содержания в сплаве сурьмы, одновременно указывает и на процент свинца. Например, в точке *a* мы имеем сплав, состоящий из 10% сурьмы и 90% свинца, а в точке *b* – из 20% сурьмы и 80% свинца. Точка А соответствует чистому свинцу, а точка В представляет собой чистую сурьму. Таким образом, на приведенной горизонтальной линии могут быть указаны все сплавы свинца с сурьмой.

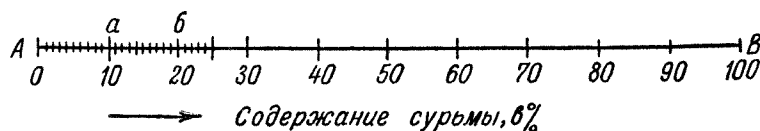


Рис. 24. Масштаб для определения состава сплава.

По оси ординат откладывают в определенном масштабе температуру. Диаграммы состояния сплавов имеют две вертикальные оси, каждая из которых представляет один из элементов сплава. Чтобы построить диаграмму состояния сплавов, вначале путем лабораторного исследования получают ряд кривых охлаждения сплавов одних и тех же элементов, но с различной их концентрацией. На основе этих кривых и строится диаграмма.

Диаграммы состояния сплавов имеют различный вид в зависимости от того, образуются ли при затвердевании сплавов механические смеси, твердые растворы или химические соединения. По этому признаку сплавы делятся на группы, каждая из которых имеет типичную диаграмму состояния. Сплавы, компоненты которых при затвердевании образуют

только механические смеси и не способны к образованию твердых растворов и химических соединений, относятся к первой группе. Диаграмму состояния этих сплавов условились называть *диаграммой состояния I рода*. Сплавы, которые при затвердевании образуют твердые растворы и не дают ни механических смесей, ни химических соединений, относятся к *диаграммам состояния II рода*.

Диаграмма состояния I рода. Наиболее типичными сплавами этой группы являются сплавы свинца с сурьмой. На примере этих сплавов и рассмотрим более подробно принцип построения диаграмм состояния сплавов. При помощи термического метода исследования получают кривые охлаждения ряда сплавов свинца с сурьмой. Чем больше будет таких кривых, тем точнее получится диаграмма состояния сплавов.

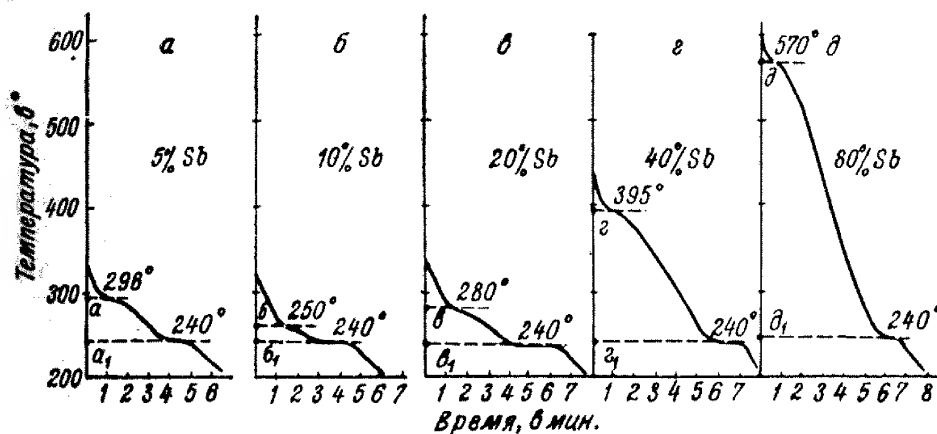


Рис. 25. Кривые охлаждения сплавов свинец — сурьма.

Для построения диаграммы возьмем пять сплавов свинца с сурьмой различной концентрации: *а* — 5% сурьмы и 95% свинца; *б* — 10% сурьмы и 90% свинца; *в* — 20% сурьмы и 80% свинца; *г* — 40% сурьмы и 60% свинца; *д* — 80% сурьмы и 20% свинца.

Кривые охлаждения указанных сплавов представлены на рис. 25. Рассмотрение приведенных кривых охлаждения сплавов показывает, что все сплавы имеют две критические температуры: верхнюю и нижнюю. Если наблюдать за процессом кристаллизации этих сплавов, то можно убедиться, что верхняя критическая температура соответствует началу затвердевания, а нижняя — концу затвердевания сплава. Таким образом, процесс кристаллизации указанных сплавов резко отличается от кристаллизации чистых металлов (см. рис. 13). Сплавы кристаллизуются в интервале температур, а чистые металлы — при постоянной температуре. Только один сплав, содержащий 13% сурьмы и 87% свинца, имеет одну критическую температуру, т. е. затвердевает при постоянной температуре. Это объясняется тем, что при указанном сочетании компонентов при температуре 240° из жидкого сплава одновременно выделяются кристаллы свинца и сурьмы, равномерно располагаясь между собой. Так как они образуются одновременно, то затрудняют рост друг друга, в результате чего получается мелкозернистая структура сплава.

Такая механическая смесь кристаллов, выделяющихся из жидкого сплава одновременно, называется *эвтектикой* (в переводе с греческого — хорошо сложенный). Сплавы указанной концентрации называют *эвтектическими*. Анализ процесса кристаллизации остальных сплавов свинца с сурьмой показывает, что в начале кристаллизации из жидкого сплава будут выделяться кристаллы того элемента, который является избыточным по отношению к эвтектическому составу (87% свинца и 13% сурьмы).

При кристаллизации сплавов *а* и *б* (рис. 25) в избытке к эвтектическому составу будет свинец; следовательно, в начале процесса кристаллизации будут выделяться кристаллы свинца. Это происходит до того момента, пока в жидком сплаве не останется 87% свинца и 13% сурьмы. Тогда при температуре 240° из оставшейся жидкости будет выделяться

эвтектика, и на этом процесс кристаллизации закончится. В твердом состоянии структура рассмотренных сплавов будет состоять из кристаллов свинца и эвтектики, представляющей собой равномерную механическую смесь свинца и сурьмы.

У сплавов *в*, *г* и *д* в избытке к эвтектическому составу будет сурьма. Поэтому процесс кристаллизации начнется с выделения кристаллов сурьмы, а закончится при температуре 240° выделением эвтектики. У этих сплавов в твердом состоянии структура будет состоять из кристаллов сурьмы и эвтектики. Чтобы построить диаграмму состояния сплавов свинец — сурьма, надо по оси абсцисс отложить концентрации рассмотренных нами сплавов и из полученных точек провести вертикальные линии, а на них отложить в определенном масштабе критические температуры начала и конца затвердевания сплава данной концентрации.

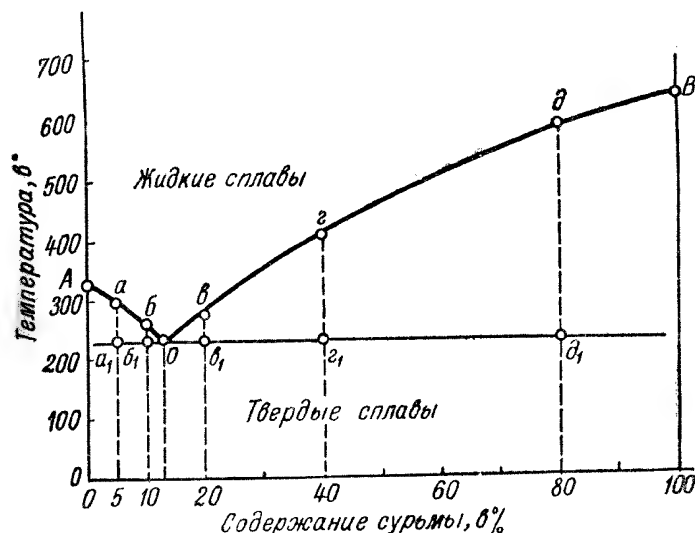


Рис. 26. Построение диаграммы состояния сплавов свинец — сурьма.

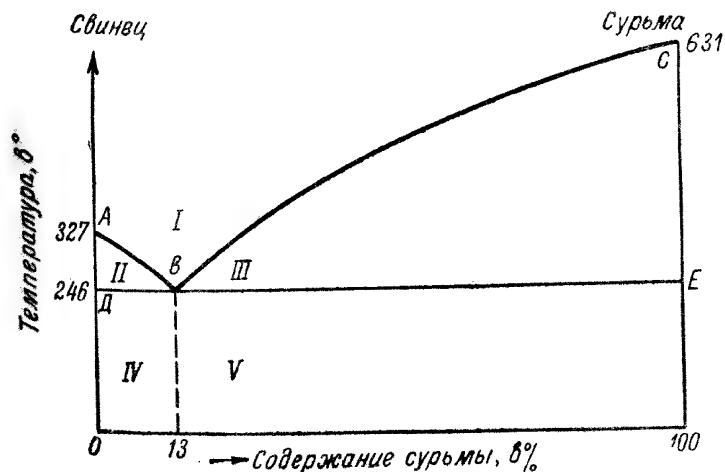


Рис. 27. Диаграмма состояния сплавов свинец — сурьма.

Эти температуры определяются из кривых охлаждения. На оси ординат, соответствующей 0% сурьмы, откладываем температуру затвердевания свинца (327°), а на оси ординат, соответствующей 100% сурьмы, - температуру затвердевания сурьмы (631°). Таким образом, на диаграмме получим ряд точек. Если точки, соответствующие началу кристаллизации различных сплавов, соединить между собой и провести линию через точки, соответствующие концу кристаллизации рассмотренных сплавов, то получим диаграмму состояния сплавов свинец — сурьма (рис. 26).

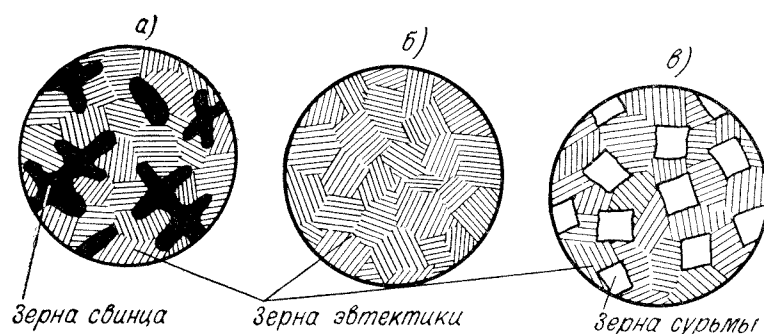


Рис. 28. Схема структур сплавов свинца с сурьмой:
а – 5% сурьмы; *б* – 13% сурьмы; *в* – 60% сурьмы.

Эта диаграмма имеет пять различных областей, дающих представление о состоянии любого сплава свинец — сурьма при любой температуре (рис. 27): I – жидкий сплав; II – кристаллы свинца и жидкий сплав; III – кристаллы сурьмы и жидкий сплав; IV – кристаллы свинца и эвтектика; V – кристаллы сурьмы и эвтектика.

Линия ABC диаграммы называется линией ликвидуса (в переводе с греческого — жидкий); выше этой линии любой сплав свинца с сурьмой будет находиться в жидком состоянии.

Линия DBE диаграммы называется линией солидуса (в переводе с греческого – твердый), или эвтектической линией. Ниже этой линии все сплавы свинца с сурьмой будут в твердом состоянии. Между линией ликвидуса и солидуса сосуществуют твердые кристаллы и жидкий сплав. Точка В диаграммы показывает состав эвтектики. Сплавы, расположенные левее этой точки, называются доэвтектическими, а правее ее – заэвтектическими. В структуре доэвтектических сплавов, кроме эвтектики, всегда будет некоторое количество свинца, а у заэвтектических, кроме эвтектики, будет сурьма. Схема структур сплавов свинца с сурьмой представлена на рис. 28.

Диаграмма состояния II рода. Из предыдущей диаграммы состояния мы видим, что жидкий раствор, в котором атомы сурьмы находились среди атомов свинца, при затвердевании распадается на кристаллы одного из металлов и эвтектику. Однако имеются такие сплавы, где жидкий раствор при затвердевании не распадается на указанные элементы. Из него образуется твердый раствор, отличающийся от жидкого только тем, что атомы в нем расположены в известном порядке в виде кристаллической решетки.

Некоторые металлы способны неограниченно растворяться друг в друге, как в жидком, так и в твердом состоянии (сплавы меди с никелем, платины с золотом, висмута с сурьмой и др.).

На примере сплавов меди с никелем рассмотрим диаграмму состояния сплавов этого типа.

Как известно из предыдущего, чтобы построить диаграмму состояния, надо знать температуры начала и конца затвердевания ряда сплавов меди с никелем, отличающихся по химическому составу (концентрации).

Построим кривые охлаждения для девяти сплавов меди с никелем и определим температуры начала и конца затвердевания этих сплавов. Полученные данные приведены в табл. 3. По оси абсцисс отложим содержание никеля (в процентах) от 0 до 100% (рис. 29). В крайних точках т. е. 0 и 100%) восставим перпендикуляры (оси ординат), на которых отложим в определенном масштабе температуры. Из расположенных по оси абсцисс точек, соответствующих концентрации взятых нами сплавов, проведем вертикальные линии и отложим на них температуры начала и конца затвердевания сплавов (см. табл. 3). Соединив плавными линиями точки *б* начала затвердевания и точки *в* конца затвердевания взятых нами сплавов, получим диаграмму состояния сплавов меди с никелем. Линией ликвидуса полученной диаграммы будет кривая, проведенная через точки *б*, а линией солидуса кривая, проведенная через точки *в*.

Таблица 3. Температура начала и конца затвердевания сплавов меди с никелем.

№ сплава	Состав сплава	Температура начала затвердевания (в °)	Температура конца затвердевания (в °)
1	90% меди и 10% никеля	1140	1100
2	80% меди и 20% никеля	1190	1130
3	70% меди и 30% никеля	1240	1160
4	60% меди и 40% никеля	1280	1190
5	50% меди и 50% никеля	1320	1220
6	40% меди и 60% никеля	1350	1260
7	30% меди и 70% никеля	1380	1300
8	20% меди и 80% никеля	1410	1350
9	10% меди и 90% никеля	1430	1400

Диаграмма имеет три области: в области I все сплавы меди с никелем будут находиться в жидком состоянии, в области II будут сосуществовать кристаллы твердого раствора и жидкий сплав, а в области III все сплавы будут состоять из кристаллов твердого раствора. Принципиальное отличие полученной диаграммы состояния сплавов меди с никелем от диаграммы состояния I рода заключается в том, что температура конца затвердевания у всех сплавов меди с никелем различная, поэтому линия солидуса имеет криволинейный характер (см. рис. 29), а на диаграмме состояния I рода окончание затвердевания всех сплавов происходит при одной и той же температуре и линия солидуса прямая (см. рис. 27). Причина такого различия заключается в том, что у всех сплавов, образующих механические смеси (диаграмма I рода), концентрация жидкости в конце процесса кристаллизации всегда одинакова. У сплавов, образующих твердые растворы, концентрация жидкости в конце процесса кристаллизации будет неодинаковой. Строение сплавов меди с никелем при различных температурах показано на рис. 30. Сравнивая эти структуры со структурами сплавов первой группы, мы видим, что между ними имеется существенное отличие. У сплавов, образующих твердые растворы, микроструктура состоит, как и у чистых металлов, из однородных зерен, поэтому по микроструктуре нельзя отличать твердые растворы от чистых металлов. Они отличаются лишь строением кристаллической решетки. У чистых металлов кристаллическая решетка состоит из однородных атомов, а у твердых растворов — из атомов двух или более элементов.

Рассмотренные два типа диаграмм состояния сплавов являются наиболее простыми и вместе с тем наиболее важными. Встречаются и другие группы сплавов: например, когда компоненты, входящие в сплав, могут образовывать химические соединения или когда компоненты могут лишь в ограниченном количестве растворяться друг в друге в твердом состоянии. В указанных случаях диаграммы состояния сплавов имеют более сложный вид и представляют собой ту или другую комбинацию диаграмм состояния I и II рода.

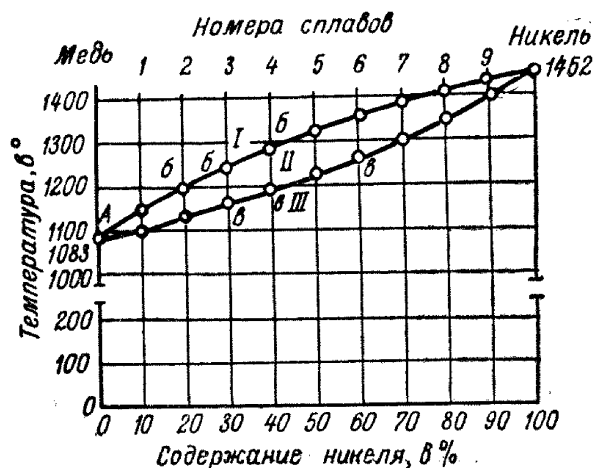


Рис. 29. Диаграмма состояния сплавов меди с никелем.

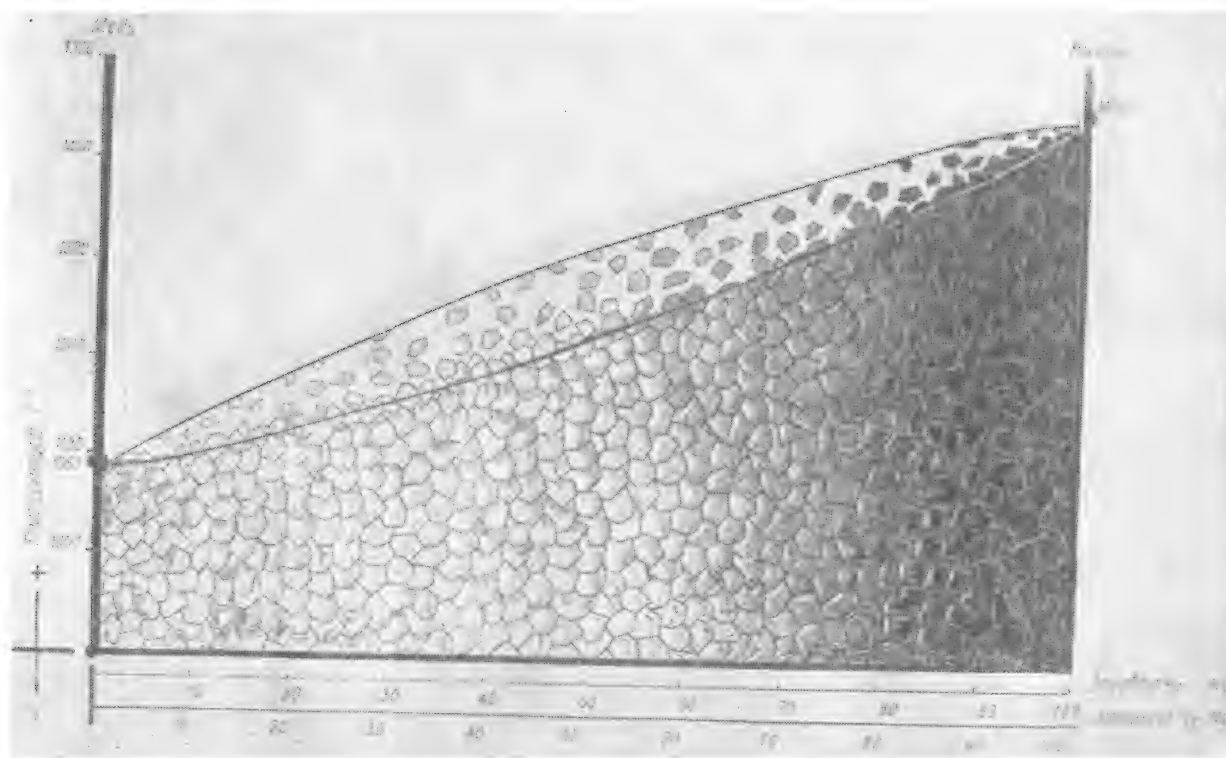


Рис. 30. Строение сплавов меди с никелем при различных температурах.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ДИАГРАММ СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ.

Построенные по нескольким кривым охлаждения диаграммы состояния сплавов представляют собой крупное научное обобщение. Они дают в сжатой и наглядной форме картину изменения строения, а следовательно и свойств сплава при изменении его концентрации и температуры. Диаграммы состояния позволяют без проведения опытов определить температуры, при которых происходят плавление и затвердевание сплавов, а также аллотропические превращения в них. По виду диаграммы состояния можно сделать заключение о возможности термической обработки сплавов. Сплавы, у которых диаграмма состояния имеет только линии ликвидуса и солидуса, могут подвергаться лишь некоторым видам термической обработки. Сплавы, у которых на диаграмме состояния ниже линии солидуса расположены другие линии, претерпевают вторичную кристаллизацию и, следовательно, могут более широко подвергаться термической обработке. Пользуясь диаграммами состояния, устанавливают режимы термической обработки материалов.

Глава IV. ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫЕ СПЛАВЫ. СТАЛЬ И ЧУГУН.

Сталь и *чугун* являются наиболее важными и широко применяемыми в технике сплавами. Достаточно отметить, что они составляют около 95% всех используемых в мире сплавов. Прежде чем перейти к изучению строения стали и чугуна, следует выяснить, что же представляют собой эти сплавы по химическому составу. *Сталью* называют сплавы железа с углеродом и другими элементами, содержащие до 2% углерода. Углерод — важная примесь стали, так как от количества его зависят прочность, твердость и пластичность стали. Кроме железа и углерода, в состав стали входят в том или ином количестве кремний, марганец, сера и фосфор. Эти примеси обычно попадают в сталь в процессе ее выплавки и являются ее неизбежными спутниками.

Чугун — это тоже сплав на железной основе. Принципиальное отличие чугуна от стали заключается прежде всего в более высоком содержании в чугуне углерода. *Чугуном* называют сплавы железа с углеродом, содержащие более 2% углерода. Чаще всего находят

применение чугуны, содержащие 3 – 3,5% углерода. В состав чугуна входят те же примеси, что и в сталь, т. е. кремний, марганец, сера и фосфор, но в несколько больших количествах. Углерод в чугуне может находиться либо в химическом соединении с железом, либо в свободном состоянии в виде графита. Чугуны, у которых весь углерод находится в химическом соединении с железом, называются белыми (по виду излома). Чугуны, у которых весь углерод или большая его часть находится в виде графита, называются серыми. В настоящей главе будет рассмотрено строение белых чугунов. Серые чугуны описываются в гл. XIII. Чтобы несколько упростить изучение строения стали и чугуна, мы будем рассматривать их как сплавы, состоящие из двух компонентов — железа и углерода. Влияние на структуру и свойства стали и чугуна остальных примесей описывается в дальнейшем.

СТРОЕНИЕ ЖЕЛЕЗА.

Прежде чем перейти к рассмотрению различных сплавов железа, познакомимся со строением и свойствами самого железа. Температура плавления железа равна 1539° . Одной из самых важных особенностей железа является его способность претерпевать превращения в твердом состоянии (аллотропические превращения). Аллотропические превращения, протекающие в чистом железе, показаны на кривой охлаждения железа (рис. 31). Из приведенной кривой видно, что железо проходит через ряд аллотропических превращений и, следовательно, может находиться в различных структурных состояниях. При обычных температурах железо имеет кристаллическую решетку центрированного куба (см. рис. 12, б).

Железо с такой кристаллической решеткой называется α -железо (альфа – железо). Решетку центрированного куба железо сохраняет до температуры 910° . При указанной температуре происходит перегруппировка атомов железа, в результате которой образуется кристаллическая решетка куба с центрированными гранями (см. рис. 12, в). Железо с такой кристаллической решеткой называется γ – железо (гамма – железо). При температуре 1400° снова происходит перегруппировка атомов железа и опять образуется кристаллическая решетка центрированного куба, которая сохраняется вплоть до температуры плавления. Железо с кристаллической решеткой центрированного куба, существующее при температуре выше 1400° , называется δ -железо (дельта-железо). В отличие от α - и γ -железа, δ -железо не имеет какого-либо значения в практике термической обработки, так как температуры нагрева стали при термической обработке лежат значительно ниже 1400° .

При обычной комнатной температуре α -железо обладает магнитными свойствами, которые сохраняются и при нагреве его до температуры 768° . При нагревании железа до температуры выше указанной оно теряет свои магнитные свойства. В интервале температур $768 - 910^{\circ}$ существует немагнитное α -железо, которое называют β -железо (бета-железо). Таким образом, основными аллотропическими формами железа являются α -железо и γ -железо. На этих модификациях основано большинство видов термической обработки стали. Мы уже знаем, что α - и γ -железо отличаются друг от друга порядком расположения атомов, т. е.

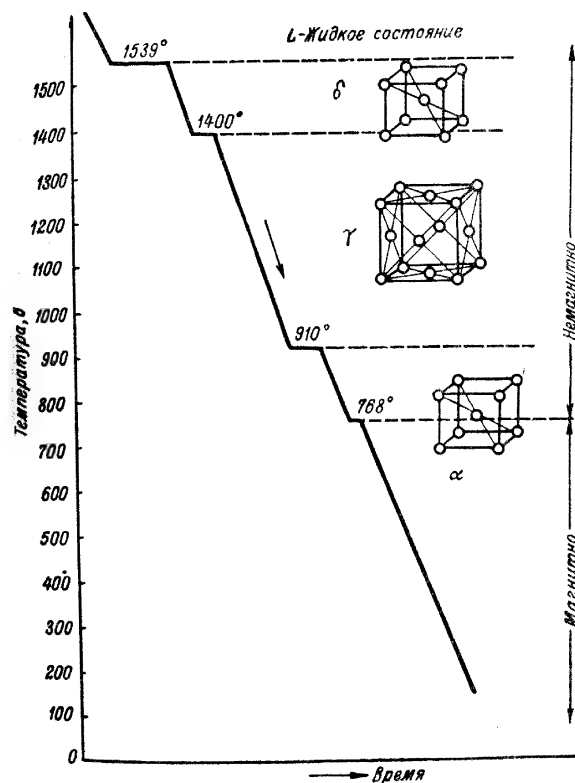


Рис. 31. Кривая охлаждения железа.

типом кристаллической решетки, а также по своим магнитным свойствам: α -железо магнитно, а γ -железо – не магнитно. Следует указать еще на одно важное различие этих двух модификаций железа. Они обладают различной способностью растворять углерод, т. е. образовывать с ним твердые растворы: α -железо может растворять ничтожное количество углерода – 0,006 – 0,04%, а γ -железо – до 2 %. Различная растворимость углерода в α -железе и γ -железе объясняется следующим. В кристаллической решетке α -железа атомы железа располагаются таким образом, что промежутки между ними очень малы и атомы углерода не могут проникнуть в эти промежутки. В кристаллической решетке γ -железа атомы расположены плотнее, но между некоторыми из них промежутки увеличены. Через эти промежутки атомы углерода проникают в кристаллическую решетку железа. Способность железа растворять неодинаковое количество углерода играет важную роль при термической обработке стали. Температуры, при которых в железе происходят аллотропические превращения, называются *критическими температурами*, или *критическими точками*.

СТРУКТУРНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ СТАЛИ И ЧУГУНА.

Структура железоуглеродистых сплавов состоит из различных составляющих. Свойствами этих структурных составляющих и определяются свойства стали и чугуна.

Феррит. В состав стали и чугуна входит от 93 до 99% железа. Поэтому, прежде всего, следует выяснить, какую структуру оно образует. Из предыдущего известно, что железо при комнатной температуре находится в виде α -железа, которое способно растворить в своей кристаллической решетке незначительное количество углерода. Твердый раствор в α -железе небольшого количества углерода и других примесей называется ферритом. Феррит представляет собой почти чистое железо, но отличается от него тем, что в его кристаллической решетке, кроме атомов железа, имеется небольшое количество атомов углерода и других примесей. Микроструктура феррита представлена на рис. 32.

Цементит. При комнатной температуре в феррите содержится до 0,006% углерода, а остальной углерод в стали находится в химическом соединении с железом. Химическое соединение железа с углеродом называется цементитом. Цементит (Fe_3C) является карбидом железа; он содержит 93,33% железа и 6,67% углерода. Цементит имеет сложную кристаллическую решетку, состоящую из 12 атомов железа и 4 атомов углерода. Таким образом, в стали весь углерод, за исключением ничтожного количества, находится в виде цементита. Это справедливо также и для так называемых белых чугунов.

Перлит. Итак, основными структурными составляющими железоуглеродистых сплавов являются феррит и цементит.

Они могут располагаться в структуре стали каждый в отдельности или в виде равномерной механической смеси, которая называется *перлитом*. Такое название эта смесь получила потому, что шлиф ее при травлении имеет перламутровый отлив. Так как перлит образуется в результате процессов вторичной кристаллизации, то его называют *эвтектоидом* (в отличие от эвтектики). Образование перлита происходит при, температуре 723°; в нем содержится 0,8% углерода. Перлит имеет две разновидности. Если цементит в перлите расположен в виде пластинок, то он называется *пластинчатым* (рис. 33). Если же цементит в перлите расположен в виде зерен, то он называется *зернистым* (рис. 34) Под микроскопом пластинки цементита кажутся блестящими, потому что цементит обладает большой твердостью, хорошо полируется и при травлении кислотами меньше разъедается, чем лежащие рядом пластинки мягкого феррита. После травления перлит в сочетании с ферритом или цементитом всегда наблюдается в виде темных участков в связи с его большой протравимостью.

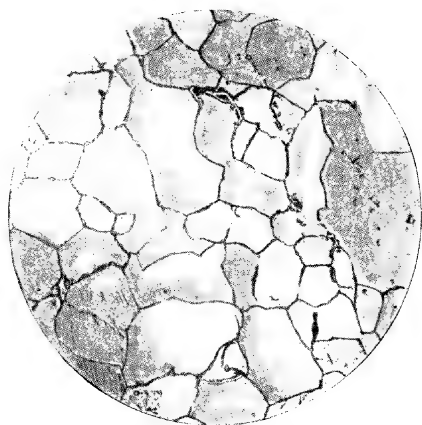


Рис. 32. Феррит
($\times 250$)

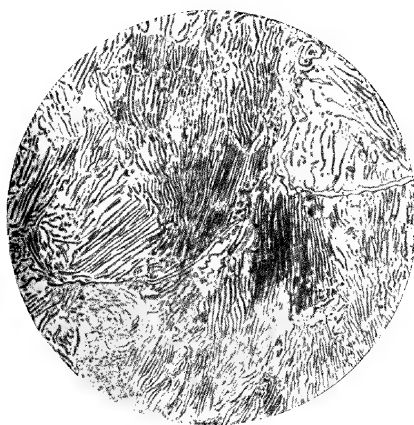


Рис. 33. Пластинчатый
перлит ($\times 500$)

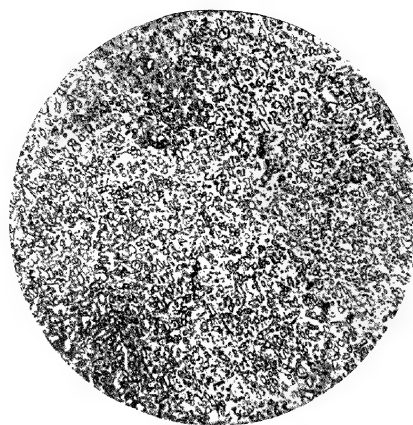


Рис. 34. Зернистый перлит
($\times 500$)

Аустенит. Если железоуглеродистые сплавы нагреть до определенных температур, то произойдет аллотропическое превращение α -железа в γ -железо и получится структурная составляющая, которая называется *аустенитом*. Аустенит представляет собой твердый раствор углерода (до 2%) и других примесей в γ -железе. Способность углерода растворяться в железе неодинакова при различных температурах. При температуре 1130° и выше в кристаллической решетке γ -железа может быть растворено максимальное количество углерода (2%). При температурах ниже 1130° растворимость углерода в γ -железе постепенно уменьшается, и избыточный углерод выделяется в виде цементита. При температуре 723° γ -железо может растворять не более 0,8% углерода. При этой температуре происходит распад аустенита с образованием перлита. Лишь в некоторых сталях, содержащих большое количество специальных добавок, можно сохранить структуру аустенита и при температурах ниже 723° (вплоть до комнатной температуры).

Ледебурит. В структуре белых чугунов всегда имеется еще одна структурная составляющая, которую называют ледебуритом. Ледебурит — это эвтектика, т. е. равномерная механическая смесь зерен аустенита и цементита, образующаяся в процессе кристаллизации. Ледебурит содержит 4,3% углерода. Образуется он при температуре 1130° . Первоначальная структура ледебурита не сохраняется при температурах ниже 723° , так как аустенит, который находится в ледебурите, при 723° превращается в перлит. При температурах ниже 723° (вплоть до комнатной температуры) ледебурит представляет собой механическую смесь перлита и цементита. Рассмотренные выше структурные составляющие стали и чугуна обладают различными свойствами. Феррит — мягкая, пластичная и относительно непрочная структурная составляющая; его относительное удлинение $\delta \approx 30\%$, твердость по Бринеллю $H_B = 50—80$, предел прочности $\sigma_s \approx 30 \text{ кг/мм}^2$. Механические свойства феррита в большой степени зависят от величины зерна. Феррит обладает магнитными свойствами. Цементит отличается большой твердостью и значительной хрупкостью. Его твердость $H_B = 800$, т. е. он в 10 раз тверже феррита. Цементит слабо магнитен, а при температурах выше 215° немагнитен. Аустенит — мягкая структурная составляющая (хотя и тверже феррита). Его твердость $H_B = 180$, относительное удлинение $\delta = 40—50\%$; отличается большой пластичностью; магнитными свойствами не обладает. Перлит состоит из феррита и цементита и поэтому его свойства определяются количеством этих двух составляющих. В перлите содержится феррита в 6 раз больше, чем цементита. Механические свойства перлита зависят также от формы цементита. У пластинчатого перлита твердость $H_B = 180—200$, предел прочности $\sigma_s \approx 80 \text{ кг/мм}^2$ и относительное удлинение $\delta = 10—12\%$. У зернистого перлита прочность и твердость несколько меньше, а пластические свойства выше. Так как в перлите железо содержится в форме α -железа, то он обладает магнитными свойствами. В ледебурите содержится 60% цементита и 40% перлита. Ледебурит отличается большой твердостью ($H_B = 550$) и значительной хрупкостью. Из рассмотрения структурных

составляющих железоуглеродистых сплавов можно сделать важный вывод. При комнатной температуре структура железоуглеродистых сплавов всегда состоит из двух структурных элементов: мягкого пластичного феррита и твердого цементита, упрочняющего сплав. Они могут сочетаться различно: либо в виде механической смеси, либо в свободном состоянии.

ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ.

Для более подробного ознакомления со структурой железоуглеродистых сплавов различного состава и превращениями, которые они претерпевают, обратимся к диаграмме состояния железоуглеродистых сплавов. После разбора сравнительно простых диаграмм состояния I и II рода и кривой охлаждения железа можно перейти к рассмотрению более сложной и важной для практики диаграммы состояния железоуглеродистых сплавов. Фундамент диаграммы состояния сплавов железа с углеродом был заложен выдающимся русским металловедом Д. К. Черновым, который в 1868 г. опубликовал ряд работ, где впервые указал на структурные превращения, протекающие в железоуглеродистых сплавах при их нагревании и охлаждении. Работы Чернова вызвали в свое время широкую дискуссию, которая послужила толчком к многочисленным исследованиям в этой области. В результате труда многих ученых в конце XIX в. появилась диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов. Следует отметить, что изучение и уточнение этой диаграммы продолжается и до настоящего времени. Диаграмма состояния сплавов железа с углеродом представлена на рис. 35.

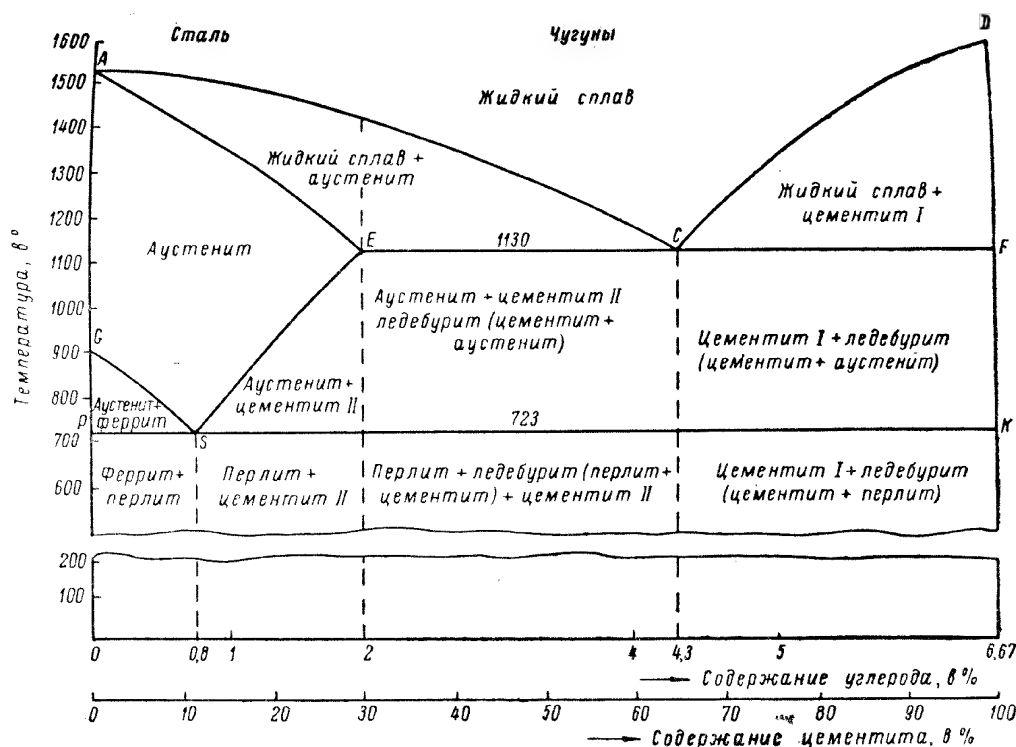


Рис. 35. Диаграмма состояния сплавов железа с углеродом.

Указанная диаграмма охватывает не все сплавы железа с углеродом, а ограничивается лишь сплавами, содержащими от 0 до 6,67% углерода, т. е. от чистого железа до цементита. Это объясняется тем, что железоуглеродистые сплавы, содержащие более 5% углерода, не представляют практического интереса. Цифра 6,67% взята в качестве предела на том основании, что при содержании углерода образуется химическое соединение Fe_3C (цементит). Как известно, химическое соединение может рассматриваться в сплавах как самостоятельный компонент и служит естественным пределом диаграммы; следовательно, рассматриваемая нами диаграмма, по существу, состоит из двух компонентов — железа и цементита. В представленной диаграмме нами допущены два упрощения: не указана область

существования δ -железа, в связи с чем упрощен левый верхний угол диаграммы, и не указана различная растворимость углерода в α -железе — упрощен левый нижний угол диаграммы. Эти упрощения не имеют существенного значения для изучения процессов термической обработки железоуглеродистых сплавов.

Процессы первичной кристаллизации железоуглеродистых сплавов. На диаграмме (см. рис. 35) изображены процессы первичной и вторичной кристаллизации железоуглеродистых сплавов. Вначале рассмотрим процессы первичной кристаллизации. Для большей наглядности выделим отдельно часть диаграммы, охватывающую процессы первичной кристаллизации (рис. 36). Эти процессы на диаграмме характеризуются кривыми ACD и AECF. Линия ACD — это линия ликвидуса; она изображает температуры, при которых начинается затвердевание железоуглеродистых сплавов. Линия AECF — это линия солидуса; она соответствует температурам, при которых процесс кристаллизации заканчивается. Линия AE относится к стали, а линия ECF — к чугунам. Точка A показывает температуру плавления чистого железа, а точка D — температуру плавления цементита. Точка E характеризует максимальное количество углерода, которое может быть растворено в железе при высоких температурах. Точка C показывает состав эвтектики; она соответствует содержанию в сплаве 4,3% углерода. Температура образования эвтектики 1130°. Линия ECF называется эвтектической, так как в любой точке этой линии происходит образование эвтектики. Рассмотрение линий ликвидуса и солидуса позволяет сделать следующие выводы о процессах первичной кристаллизации железоуглеродистых сплавов:

- 1) процесс кристаллизации любой стали, в отличие от чистого железа, протекает в интервале температур;
- 2) с повышением содержания в стали углерода температура начала и конца ее затвердевания понижается;
- 3) наиболее низкая температура конца кристаллизации стали 1130°;
- 4) все чугуны, кроме содержащего 4,3% углерода, также затвердевают в интервале температур;
- 5) температура конца затвердевания всех чугунов одинакова и равна 1130° (к концу процесса кристаллизации в чугуне всегда остается жидкий сплав эвтектического состава, содержащий 4,3% углерода).

По виду структур, образующихся при первичной кристаллизации, все железоуглеродистые сплавы, представленные на диаграмме, можно разбить на три группы (см. рис. 36). К группе I относятся все сплавы, содержащие не более 2% углерода, т. е. стали. В процессе их кристаллизации из жидкого сплава будут образовываться кристаллы твердого раствора углерода в γ -железе, т. е. аустенит. Таким образом, все сплавы этой группы по окончании процесса затвердевания будут состоять из кристаллов аустенита. К сплавам группы II относятся белые чугуны, содержащие от 2 до 4,3% углерода. Эти сплавы могут образовывать эвтектику. Из предыдущего (гл. III) известно, что у таких сплавов в начале кристаллизации выделяется тот компонент, который находится в избытке к эвтектическому составу. У рассматриваемых чугунов в избытке к эвтектике будет железо. Следовательно, так же как и у стали, из жидкого сплава будут выделяться кристаллы аустенита. Разница состоит в том, что при температуре 1130° (в конце процесса кристаллизации чугуна) будет образовываться эвтектика — ледебурит. Таким образом, по окончании процесса кристаллизации структура сплавов группы II будет состоять из аустенита и ледебурита. Процесс кристаллизации

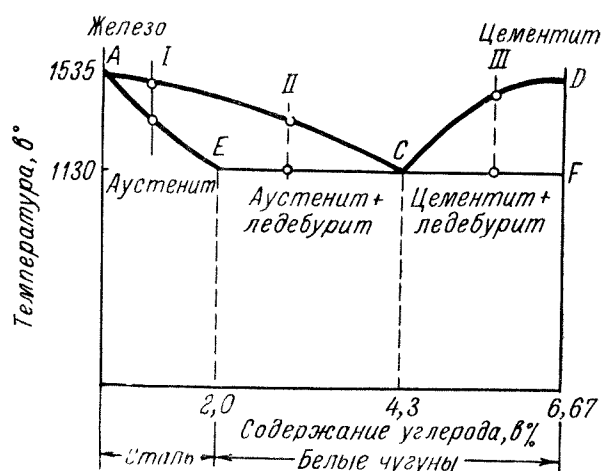


Рис. 36. Первичная кристаллизация железоуглеродистых сплавов.

сплавов группы III будет носить несколько иной характер. Так как все сплавы этой группы содержат более 4,3% углерода, то в избытке к эвтектическому составу будет углерод. Следовательно, процесс затвердевания сплавов группы III начнется с выделения в виде кристаллов цементита избыточного углерода. Когда в жидком сплаве останется 4,3% углерода, то затвердевание закончится образованием эвтектики — ледебурита. Все сплавы группы III по окончании процесса кристаллизации будут иметь структуру цементита и ледебурита. Если сплав содержит 4,3% углерода, т. е. имеет эвтектический состав, то его кристаллизация будет протекать при постоянной температуре. Структура такого сплава после затвердевания будет состоять из ледебурита, т. е. из механической смеси аустенита и цементита. Таким образом, в результате первичной кристаллизации сталь получает структуру аустенита, которая отличается хорошей пластичностью и вязкостью, поэтому сталь сравнительно легко подвергается обработке давлением при высоких температурах.

Все белые чугуны имеют в составе своей структуры в том или ином количестве хрупкий и твердый ледебурит. Это исключает возможность их обработки давлением. Такое коренное изменение технологических свойств сплавов в зависимости от содержания углерода — причина того, что именно 2% углерода является границей, которая делит железоуглеродистые сплавы на две группы — сталь и чугун. Процессы вторичной кристаллизации стали. Если бы железо не испытывало структурных превращений в твердом состоянии, то диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов сохраняла бы при всех температурах ниже 1130° (вплоть до комнатной температуры) вид, представленный на рис. 35. Однако, как известно, железо испытывает аллотропические превращения, поэтому железоуглеродистые сплавы не сохраняют своей первичной структуры.

Рассмотрим процессы вторичной кристаллизации стали. Для наглядности выделим отдельно левую часть диаграммы (рис. 35), которая охватывает область стали (рис. 37).

Из предыдущего известно, что первичная структура стали состоит из зерен аустенита. Она сохраняется до линии GSE. Указанная линия соответствует температурам, при которых начинается вторичная кристаллизация сталей различного состава.

Линия PSK показывает температуру, при которой завершаются процессы вторичной кристаллизации сталей. Для сталей, представленных на диаграмме, эта температура равна 723°. При температурах ниже указанной существенных превращений в своем строении стали не испытывают. Линия PSK называется эвтектоидной линией. Следовательно, структура, полученная при температуре 723°, сохраняется при дальнейшем охлаждении сплава (вплоть до комнатной температуры). Точка S диаграммы соответствует составу эвтектоида — перлита. Какие же структурные превращения протекают в стали в твердом состоянии? Начнем изучение этих превращений с линии GS.

Точка G показывает превращения в чистом железе. Она соответствует температуре 910°. Из предыдущего (см. рис. 31) известно, что при этой температуре происходит превращение γ -железа в α -железо. У сталей этот процесс также происходит, но ввиду того, что в решетке γ -железа имеется то или иное количество углерода, он протекает при более низких

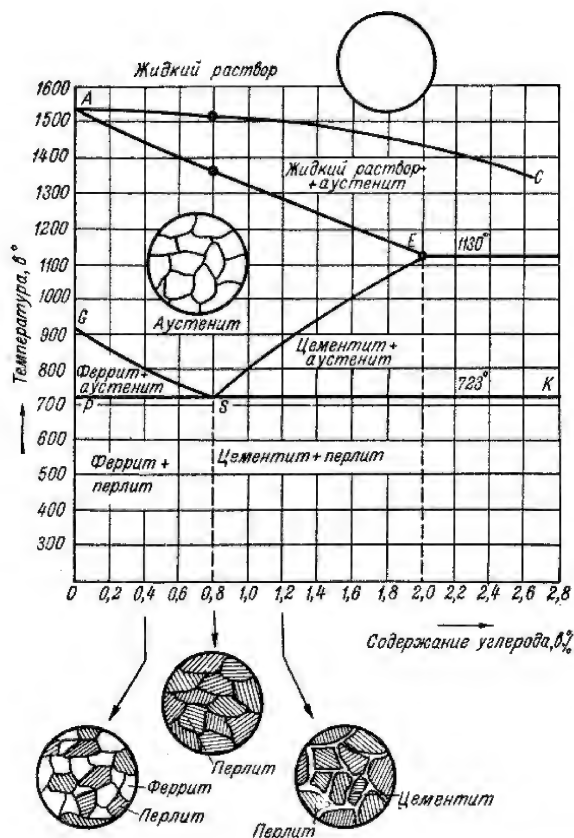


Рис. 37. Вторичная кристаллизация стали.

температурах, чем у чистого железа. Кроме того, превращение γ -железа в α -железо у сталей происходит не при постоянной температуре, а в интервале температур. Следовательно, линия GS диаграммы показывает для сталей, содержащих до 0,8% углерода, температуры, при которых начинается превращение аустенита в феррит (так как у стали мы имеем не чистое γ -железо, а твердый раствор углерода в γ -железе, т. е. аустенит). На примере стали, содержащей 0,6% углерода, рассмотрим более подробно процесс вторичной кристаллизации сталей этой группы. Указанная сталь будет сохранять первичную структуру аустенита до температуры 775° (точка 1 на рис. 38). При температуре 775° в стали начинается аллотропическое превращение, т. е. переход аустенита в феррит. Так как в феррите содержится ничтожное количество углерода, то его концентрация в оставшемся аустените будет постепенно, по мере выделения феррита, увеличиваться (количество железа в аустените становится всё меньше, а количество углерода почти не изменяется). Когда в результате образования феррита концентрация углерода в оставшемся аустените достигнет 0,8%, то при температуре 723° (точка 2) произойдет распад аустенита на равномерную механическую смесь феррита и цементита, которая называется перлитом. Схема структурных превращений рассмотренной стали показана на рис. 38, где: 1 — первичная структура — зёрна аустенита; 2 — структура при температуре 770° — феррит и аустенит (жирными линиями изображены границы зерен феррита); 3 — структура при температуре 730° — феррит и аустенит (феррита значительно больше, чем при температуре 770°); 4 — структура при температурах ниже 723° — феррит и перлит. Таким образом, в интервале температур 775—723° структура стали, содержащей 0,6% углерода, будет состоять из феррита и аустенита, а при температурах ниже 723° — из феррита и перлита. Эта структура сохраняется без значительных изменений при дальнейшем охлаждении вплоть до комнатной температуры. Аналогичные превращения будут происходить у всех сталей, содержащих менее 0,8% углерода. Разница будет лишь в температурах начала превращения аустенита в феррит.

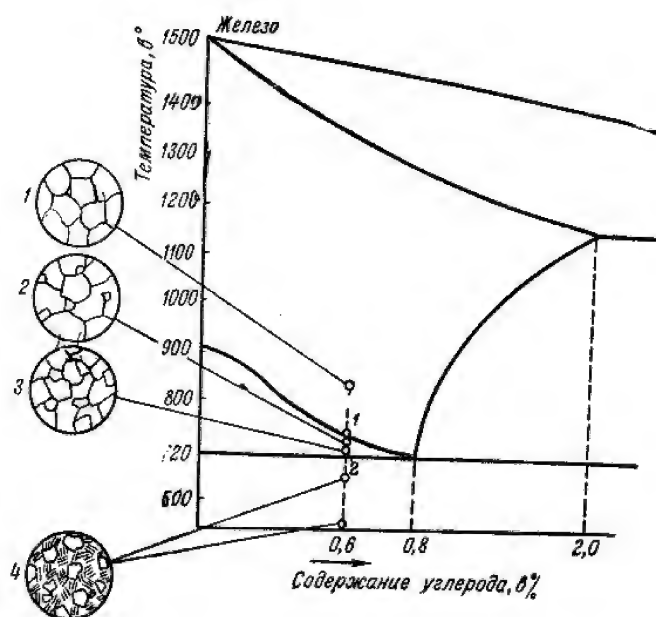


Рис. 38. Схема структурных превращений стали, содержащей 0,6% углерода.

Если сталь содержит 0,8% углерода, то ее вторичная кристаллизация будет протекать при постоянной температуре (723°) и сопровождаться только одним процессом — образованием перлита. Это объясняется тем, что в данном случае содержание углерода в стали соответствует эвтектоидному составу. Процесс вторичной кристаллизации стали, содержащей более 0,8% углерода, представлен на диаграмме (рис. 37) линиями ES и SK. Точка E показывает максимальное количество углерода, которое может быть растворено в аустените. Линия ES указывает предельную растворимость углерода в аустените при

различных температурах. Точка 5 характеризует количество углерода, которое может быть растворено в аустените при температуре 723° . На линии SK заканчивается вторичная кристаллизация сталей, содержащих более 0,8% углерода, с образованием перлита (в результате распада аустенита). На примере стали, содержащей 1,2% углерода, рассмотрим более подробно процессы вторичной кристаллизации стали этой группы.

Сталь, содержащая 1,2% углерода, сохраняет первичную структуру аустенита при охлаждении до температуры 870° . При более низкой температуре аустенит уже не способен растворить 1,2% углерода, поэтому при дальнейшем охлаждении сплава из кристаллической решетки аустенита будет выделяться избыточный углерод в виде цементита. Так как этот цементит выделяется в результате вторичной кристаллизации, то его называют *вторичным цементитом* и обозначают Fe_3C_{II} . В отличие от первичного цементита, который образуется в процессе первичной кристаллизации чугунов. Вследствие выделения цементита содержание углерода в оставшемся аустените будет непрерывно понижаться и при температуре 723° достигнет 0,8%. При этой температуре произойдет превращение аустенита в перлит. На этом закончится процесс вторичной кристаллизации. Таким образом, рассматриваемая сталь в интервале температур $870—723^{\circ}$ имеет структуру аустенита и вторичного цементита, а при температурах ниже 723° будет состоять из перлита и вторичного цементита. Аналогичные превращения в твердом состоянии будут испытывать все стали, содержащие более 0,8% углерода. Разница будет лишь в температурах начала выделения вторичного цементита. Различают три группы сталей в зависимости от содержания в них углерода. Стали, содержащие менее 0,8% углерода, называются доэвтектоидными, содержащие 0,8% углерода — *эвтектоидными*, а свыше 0,8% углерода — *заэвтектоидными*. На рис. 37 показаны схемы микроструктур доэвтектоидной стали с содержанием 0,4% углерода, эвтектоидной и заэвтектоидной стали с 1,2% углерода. Доэвтектоидные стали имеют при комнатной температуре структуру феррита и перлита. Чем больше в них углерода, тем больше будет перлита и меньше феррита. Структура эвтектоидной стали состоит только из перлита. Заэвтектоидные стали имеют при комнатной температуре структуру перлита и цементита. С увеличением в этих сталях углерода растет количество цементита и уменьшается количество перлита. Микроструктуры сталей с различным содержанием углерода представлены на рис. 39.

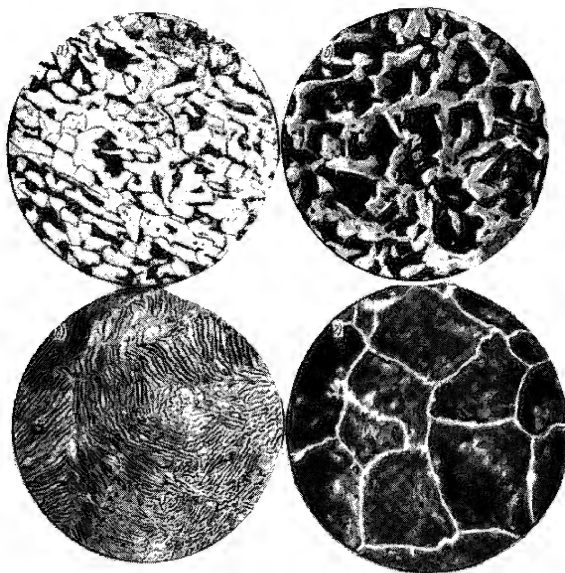


Рис. 39. Микроструктура сталей с различным содержанием углерода:
а — 0,2%; б — 0,45%; в — 0,8%; г — 1,3% ($\times 250$).

Процессы вторичной кристаллизации белых чугунов. Первичная структура белых чугунов может состоять из ледебурита, аустенита и первичного цементита. Так как ледебурит представляет собой механическую смесь аустенита и цементита, то, по существу,

структура белого чугуна состоит из аустенита и первичного цементита. Цементит не претерпевает структурных превращений в твердом состоянии, следовательно, вторичная кристаллизация чугунов связана только с теми превращениями, которые происходят в аустените при его охлаждении. Высокоуглеродистый аустенит при охлаждении претерпевает два превращения. Первое состоит в выделении избыточного углерода в виде вторичного цементита. Оно протекает в диапазоне температур $1130 - 723^{\circ}$. Второе превращение аустенита заключается в образовании при температуре 723° перлита. Указанные превращения протекают и в аустените, входящем в состав ледебурита. Поэтому при температурах ниже 723° ледебулит представляет собой механическую смесь перлита и цементита. В результате рассмотренных превращений белые чугуны при комнатной температуре имеют структуру, указанную на рис. 35. В зависимости от содержания углерода белые чугуны делятся на три группы:

- 1) доэвтектические чугуны, расположенные левее эвтектической точки С; они содержат от 2 до 4,3% углерода; структура этих чугунов состоит из перлита, ледебурита и небольшого количества вторичного цементита;
- 2) эвтектические чугуны, содержащие 4,3% углерода; они имеют структуру ледебурита;
- 3) заэвтектические чугуны, расположенные правее эвтектической точки С; они содержат более 4,3% углерода и состоят из ледебурита и первичного цементита. Микроструктуры указанных чугунов показаны на рис. 40. Распределение структурных элементов в различных областях диаграммы состояния железоуглеродистых сплавов показано на рис. 41.

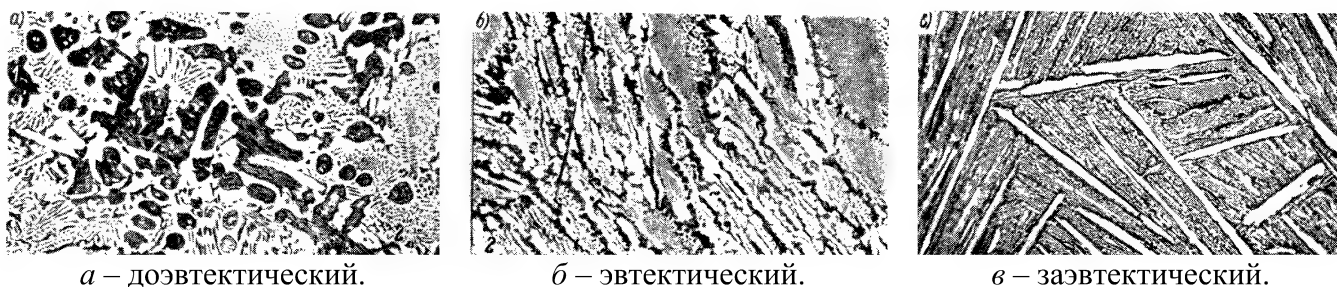


Рис. 40. Структура белых чугунов:
1 — перлит; 2 — ледебурит; 3 — цементит ($\times 250$)

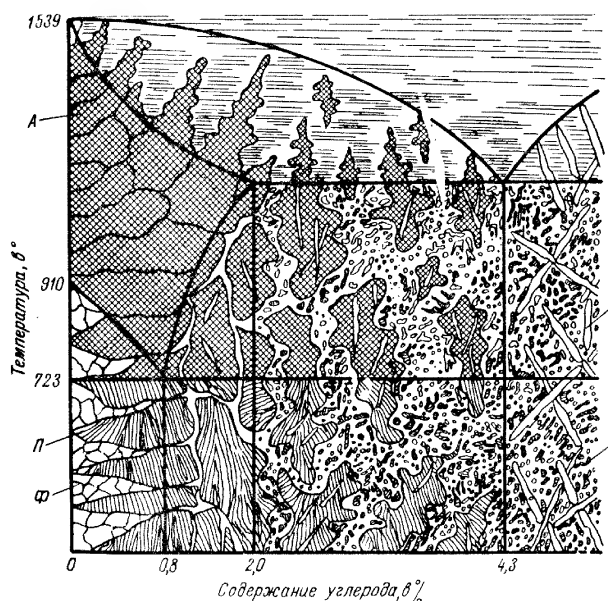


Рис. 41. Распределение структурных элементов в различных областях диаграммы состояния железоуглеродистых сплавов: А — аустенит; П — перлит; Ф — феррит; Ц — цементит; Л — ледебурит.

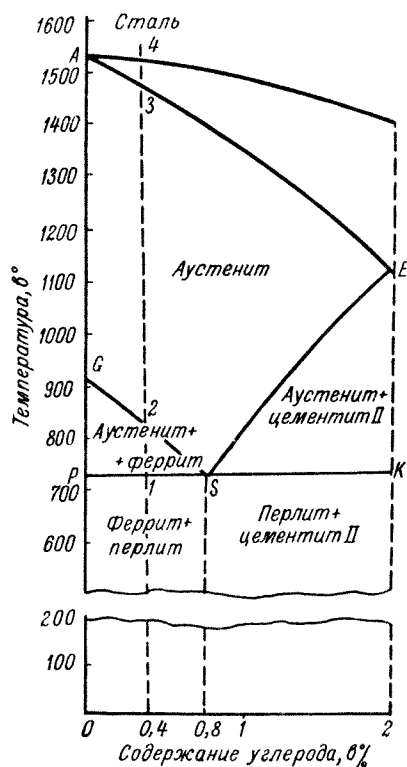


Рис. 42. Практическое использование диаграммы состояния железоуглеродистых сплавов.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ.

Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов имеет огромное практическое значение. Пользуясь этой диаграммой, можно установить температуры начала и конца затвердевания и плавления любой углеродистой стали; определить температуры начала и конца горячей обработки давлением; установить зоны перегрева и пережога стали; легко и быстро выбрать правильный режим термической обработки стали. Диаграмма показывает, какую структуру будет иметь сталь при комнатной температуре. Чтобы получить необходимые данные для какой – либо стали, надо из точки на оси абсцисс, указывающей содержание в стали углерода, восставить перпендикуляр. Точки пересечения этого перпендикуляра с линиями диаграммы укажут необходимые сведения. Возьмем для примера сталь, содержащую 0,4% углерода. Точка 1 (рис. 42) показывает температуру, при которой перлит переходит в аустенит, точка 2 – температуру, при которой заканчивается превращение феррита в аустенит. Расстояние между точками 2 и 3 указывает зону температур, при которых существует аустенит. Точка 3 соответствует температуре, при которой сталь начинает плавиться, а точка 4 – температуре, при которой заканчивается плавление стали. Из диаграммы видно также, что рассматриваемая сталь при комнатной температуре состоит из феррита и перлита. Можно даже определить, какую площадь занимают феррит и перлит. Известно, что если сталь содержит 0,8% углерода, то ее структура состоит целиком из перлита (100% перлита). Значит, сталь, содержащая 0,4% углерода, будет иметь:

$$0,8 / 100 = 0,4 / X; X = 0,4 \times 100 / 0,8 = 50\% \text{ перлита}$$

Таким образом, структура стали, содержащей 0,4% углерода, будет состоять из 50% перлита и 50% феррита. Можно решить и обратную задачу, т. е. по структуре определить содержание в стали углерода. При использовании приведенной диаграммы состояния железоуглеродистых сплавов следует иметь в виду, что ее данные относятся лишь к обычным углеродистым сталям. Для изучения стали, содержащей специально введенные присадки, она применяться не может.

При использовании диаграммы состояния следует иметь в виду два важных обстоятельства. Рассмотренные структурные превращения протекающие в процессе охлаждения железоуглеродистых сплавов, являются обратимыми, т. е. при нагревании сплава наблюдаются обратные явления. Например, если при охлаждении аустенит переходит в перлит, то при нагревании перлит превращается в аустенит. Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов показывает те превращения, которые имеют место при довольно медленном охлаждении, когда успевают произойти все процессы. При быстром охлаждении сплава (например, при закалке) структурные превращения будут носить иной характер, о чем будет изложено в следующей главе.

ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННЫХ ПРИМЕСЕЙ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СТАЛИ.

Чтобы облегчить изучение строения стали и чугуна, мы рассматривали их до сих пор как простые двойные сплавы железа с углеродом. Однако известно, что любая сталь и чугун имеют в своем составе в качестве неизбежных спутников кремний, марганец, фосфор и серу. У обычных сталей допускается следующее количество указанных примесей: кремния – до 0,4%, марганца – до 0,8%, фосфора – до 0,05%, серы – до 0,05%. Следует выяснить, как располагаются эти примеси в структуре стали и какое влияние они оказывают на ее свойства. Такие примеси, как марганец, кремний и фосфор, не образуют в структуре стали

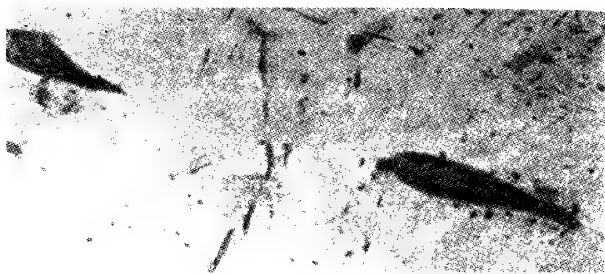


Рис. 43. Скопления сернистых включений в структуре стали – нетравленный шлиф ($\times 500$)

самостоятельных зерен, — они в основном растворяются в феррите. В кристаллической решетке феррита расположены, кроме атомов углерода, также и атомы кремния, марганца и фосфора. Следовательно, рассматривая структуру стали, мы этих примесей не увидим. Сера в железе почти не растворима, а в структуре стали она образует химические соединения – сернистое железо (FeS) или сернистый марганец (MnS). Сульфиды железа и

марганца, а также соединения кислорода с металлом (FeO , MnO), находящиеся в структуре стали, называют неметаллическими включениями. Они наблюдаются под микроскопом на нетравленном полированном микрошлифе (рис. 43). Влияние примесей на свойства стали неодинаково. Наиболее серьезное влияние на свойства стали оказывает углерод. С увеличением содержания углерода твердость стали повышается, а относительное удлинение δ и относительное сужение ψ понижаются. Предел прочности σ_b и предел упругости σ_e стали повышаются с увеличением содержания углерода до 0,8—0,9%. При дальнейшем увеличении содержания углерода в структуре стали появляется свободный цементит, который располагается по границам зерен перлита в виде сетки. Вследствие исключительной хрупкости цементита понижается не только пластичность стали, но и ее упругость и прочность. Изменение механических свойств стали в зависимости от содержания углерода приведено на рис. 44. Кремний и марганец в тех количествах, в каких они содержатся у обычной стали, не оказывают заметного влияния на ее свойства. Сера и фосфор — вредные примеси стали. При повышенном содержании фосфора в стали наблюдается явление *хладноломкости*, т. е. сталь делается хрупкой, особенно при низкой температуре (на морозе). Причина этого явления состоит в том, что атомы фосфора, располагаясь в решетке железа, сильно искажают ее, так как атомы фосфора резко отличаются от атомов железа. Кроме того, фосфор неравномерно распределяется в стали, скапливаясь на отдельных участках в значительном количестве. Такое неравномерное распределение примесей в данном объеме стали и в объеме каждого кристалла называется *ликвацией*.

Вредное влияние фосфора особенно сильно проявляется в сталях с повышенным содержанием углерода, так как углерод уменьшает растворимость фосфора в стали. Вытесненный из твердого раствора фосфор располагается в виде хрупкой эвтектики по границам структурных составляющих, ослабляет сцепление между ними и способствует хрупкости стали.

Повышенное содержание в стали серы вызывает явление краснеломкости: в стали при обработке ее давлением при температурах 900 – 1200° образуются трещины. Причина этого заключается в том, что сернистое железо располагается по границам зерен железа в виде механической смеси, которая имеет температуру плавления 985°. При высоких температурах эта смесь расплавляется, вследствие чего уменьшается связь между зернами. Если сера находится в виде сернистого марганца, то она оказывает менее вредное влияние на свойства

стали. Сернистый марганец имеет более высокую температуру плавления (1620°), поэтому он затвердевает раньше стали и располагается не по границам зерен, а обособленными участками. В отдельных случаях примеси серы и фосфора в стали играют положительную роль, так как способствуют хорошей обрабатываемости ее на станках. Поэтому у некоторых сталей допускается содержание серы до 0,3% и фосфора до 0,15%. Такие стали называются автоматными. Они используются для изготовления изделий на станках-автоматах.

УГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ И ИХ МАРКИРОВКА.

Углеродистыми называются такие стали, которые имеют в своем составе, кроме углерода, небольшое количество постоянных примесей (кремния, марганца, фосфора, серы). Эти примеси попадают в сталь в процессе ее выплавки независимо от нашего желания. Кроме углеродистой, различают еще легированные стали, содержащие специально введенные элементы (никель, хром и др.) для получения тех или иных свойств стали. В зависимости от области применения углеродистые стали делятся на две группы:

- 1) конструкционные, из которых изготавливают части машин (валы, шатуны, пружины и т. п.), рельсы, станки и т. д.;
- 2) инструментальные, применяемые для изготовления инструмента – резцов, фрез, сверл, калибров, зубил, штампов и др.

Конструкционная сталь обычно содержит не более 0,6 – 0,7% углерода, а инструментальная – от 0,7 до 1,3%. Существует много различных марок углеродистой стали. Химический состав наиболее часто применяемых углеродистых сталей и их обозначения узаконены государственными общесоюзными стандартами (ГОСТ). Каждый стандарт имеет номер, две последние цифры которого указывают год издания стандарта. На углеродистую сталь имеется несколько стандартов. В ГОСТ 380 – 57 на конструкционную сталь обычного качества входит семь основных марок: Ст. 1, Ст. 2, Ст. 3, Ст. 4, Ст. 5, Ст. 6, Ст. 7. Чем больше номер стали, тем выше в ней содержание углерода. Например, сталь марки Ст. 1 содержит 0,07—0,12% углерода, а сталь марки Ст. 7 – 0,5 – 0,63% углерода. В ГОСТ 1050 – 57 на качественную конструкционную сталь входят следующие марки: 05кп, 05, 08кп, 10, 15, 20, 25, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70. Цифры показывают примерное содержание в стали углерода в сотых долях процента. Например, сталь 10 содержит 0,1% углерода, а сталь 70 – 0,7% углерода. Буквы кп, стоящие после цифры, означают, что сталь по способу изготовления кипящая. Качественные конструкционные стали отличаются более высокими свойствами, чем обычные (они содержат меньше серы и фосфора), но они дороже, поэтому применяются для более ответственных изделий. На инструментальные углеродистые стали имеется ГОСТ В – 1435 – 54, в который входят марки качественной стали У7, У8, У9, У10, У11, У12, У13 и марки высококачественной стали У7А, У8А и т. д. Буква У показывает, что сталь углеродистая, а цифра – среднее содержание углерода в десятых долях процента. Чем больше в стали углерода, тем она тверже, но зато и более хрупка. Буква А означает, что сталь высококачественная, т. е. в ней содержится меньшее количество серы и фосфора.

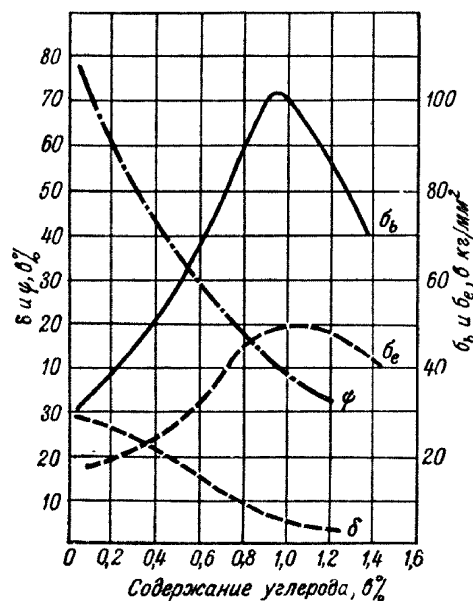


Рис. 44. Изменение механических свойств стали в зависимости от содержания углерода.

Области применения углеродистой стали различных марок указаны в табл. 4.

Таблица 4. Назначение углеродистой стали различных марок.

Виды изделий	Марки стали
Сварные и клепаные конструкции	Ст. 2, Ст. 3
Болты, гайки, винты, заклепки	Ст. 2, Ст. 3
Валы, оси, шатуны	Ст. 5, Ст. 6, 30, 40
Пружины	50, 60, 70
Зубила, кувалды, штанги	У7, У8
Резцы, сверла, фрезы, калибры, метчики	У10, У11, У12, У10А, У11А, У12А

Глава V

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ.

Термической обработкой называется технологический процесс тепловой обработки металлов и сплавов, в результате которого изменяются их свойства в желательном для нас направлении. Это достигается путем изменения структуры металла и сплава. Следовательно, задачей термической обработки является изменение строения обрабатываемых материалов. Любая термическая обработка состоит из трех операций, следующих одна за другой:

- 1) нагрев до определенной температуры;
- 2) выдержка при заданной температуре;
- 3) охлаждение с различной скоростью от заданной температуры до комнатной. Таким образом, процессами термической обработки управляют два основных элемента – температура и время. Поэтому любой процесс термической обработки можно изобразить в виде графика, где по оси ординат откладывается температура, а по оси абсцисс — время (рис. 45). Регулируя температуру и время,

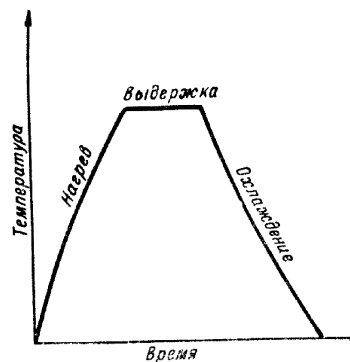


Рис. 45. График термической обработки.

можно осуществить следующие виды термической обработки стали: *отжиг*, *нормализацию*, *закалку* и *отпуск*. Рассмотренная в гл. IV диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов показывает структурные превращения, которые протекают в стали при достаточно медленном нагревании и охлаждении ее, когда успевают произойти все превращения, которые могут иметь место в стали. Структуры стали – феррит, перлит и цементит – являются устойчивыми при комнатной температуре, или, как их иначе называют, равновесными структурами. Однако получаемые структуры могут, значительно видоизменяться в зависимости от условий нагрева и охлаждения стали. Например, применяя определенный режим тепловой обработки стали, можно сохранить структурные составляющие, которые были до обработки, но изменить форму или размеры зерен и благодаря этому получить требуемые механические свойства стали. Так можно получить зернистый перлит вместо пластинчатого или мелкопластинчатый перлит вместо крупнопластинчатого. С помощью термической обработки можно получить так называемые неустойчивые структуры стали. Термическая обработка является очень мощным фактором изменения свойств стали. Это наглядно иллюстрируется следующим примером. Возьмем два образца из одной и той же стали и нагреем их вместе в печи до одинаковой критической температуры. Затем один образец будем охлаждать до комнатной температуры медленно, постепенно вместе с печью, а второй охладим быстро, опустив в воду комнатной температуры. В результате получим два образца стали с противоположными свойствами. Образец, который охлаждался с печью, будет сравнительно мягким и не очень прочным, а

второй образец, охлаждавшийся в воде, будет обладать очень высокой твердостью и прочностью. Так, например, у стали, содержащей 0,8% углерода, в зависимости от скорости охлаждения можно получить твердость $H_B = 160 - 600$. Чтобы понять сущность явлений, вызывающих изменение механических свойств стали при тепловой обработке, рассмотрим процессы, протекающие в углеродистой стали при термической обработке.

КРИТИЧЕСКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СТАЛИ И ИХ ОБОЗНАЧЕНИЕ.

При термической обработке стали нужно точно знать температуры, при которых в ней происходят те или иные превращения. Эти температуры называют *критическими*. Положение критических температур для любой углеродистой стали легко определяется из диаграммы состояния железоуглеродистых сплавов. Для удобства критические температуры стали условно обозначаются буквой А с цифрой внизу, указывающей характер превращения. Положение критических температур на диаграмме состояния железоуглеродистых сплавов показано на рис. 46. Наиболее важными критическими температурами являются следующие: A_1 – линия PSK. диаграммы; A_3 – линия GS и A_{cm} – линия ES диаграммы. Как видно из представленной диаграммы, критическая температура A_1 для обычных углеродистых сталей равна 723° . Ее называют *нижней критической температурой*, а температуры A_3 и A_{cm} – *верхними критическими температурами*. Критические температуры углеродистой стали, определяемые при нагревании и при охлаждении, не всегда совпадают. Обычно структурные превращения в процессе нагревания протекают при более высокой температуре, чем при охлаждении. Например, переход перлита в аустенит для данной стали будет происходить при более высоких температурах, чем обратное превращение аустенита в перлит.

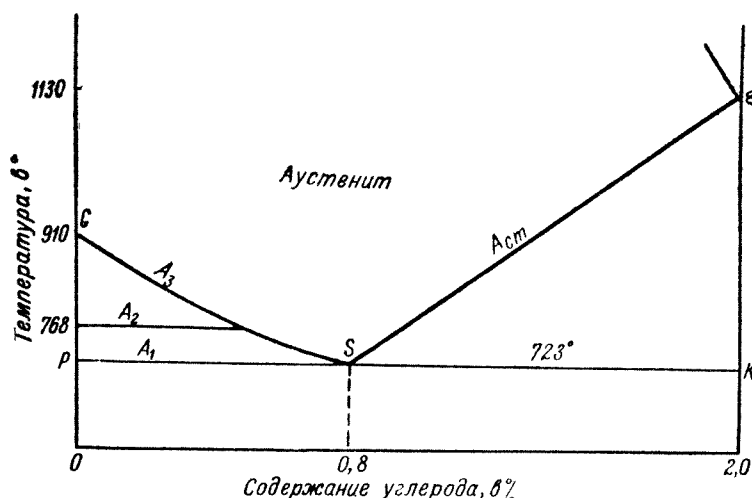


Рис. 46. Положение критических температур на диаграмме состояния железоуглеродистых сплавов.

Поэтому когда идет речь о критической температуре, нужно знать, получена она при нагревании или при охлаждении. Для этого внизу буквы А перед цифрой ставится буква *c*, если температура получена при нагревании, и *r*, если она получена при охлаждении. Таким образом, критические температуры имеют следующие обозначения:

A_{r1} – образование перлита из аустенита;

A_{c1} – образование аустенита из перлита;

A_{r3} – начало образования зерен феррита из аустенита;

A_{c3} – конец превращения феррита в аустенит и образование однородной структуры аустенита;

A_{cm} – начало выделения вторичного цементита из аустенита при охлаждении или конец растворения вторичного цементита в аустените при нагревании. Кроме указанных

главнейших критических температур, имеются еще две: A_2 , показывающая магнитное превращение в стали (для обычной углеродистой стали всегда равна 768°), и A_4 , при которой твердый раствор углерода в δ -железе переходит в аустенит. Эта температура расположена в верхнем левом углу диаграммы. Ввиду того что на рис. 46 диаграмма приведена в упрощенном виде, критическая температура A_4 на ней не показана. Критические температуры A_2 и A_4 не имеют практического значения для термической обработки стали.

ПРЕВРАЩЕНИЯ В СТАЛИ ПРИ ЕЕ НАГРЕВЕ.

Для рассмотрения превращений, протекающих в стали при ее нагреве, обратимся к диаграмме состояния железоуглеродистых сплавов (см. рис. 35). В зависимости от содержания углерода сталь в исходном состоянии, т. е. до термической обработки, имеет следующую структуру: феррит + перлит, перлит или перлит + вторичный цементит. При нагревании стали до температур ниже 723° она не будет претерпевать превращений в своем строении, т. е. указанные выше структуры сохранятся. При температуре 723° произойдет превращение перлита в аустенит. Образование аустенита сопровождается двумя процессами – перестройкой кристаллической решетки $Fe\alpha$ в $Fe\gamma$ и растворением цементита в образовавшемся $Fe\gamma$. Если в стали, кроме перлита, имеется феррит, то его превращение в аустенит будет происходить при дальнейшем повышении температуры вплоть до линии GS, т. е. до критической температуры A_{c3} . Если же в стали, кроме перлита, содержится цементит, то он будет растворяться в аустените при нагреве до линии ES, т. е. до критической температуры A_{cm} . Образовавшийся аустенит не однороден по своему составу, так как процесс диффузии углерода в аустените не завершается при переходе через критические температуры A_{c3} и A_{cm} . Чтобы получить однородный по составу аустенит, необходимо либо повысить температуру нагрева, либо увеличить выдержку при заданной температуре. При термической обработке сталь обычно нагревают на $30 - 50^\circ$ выше критических температур. Образовавшийся при этих температурах аустенит состоит из мелких зерен независимо от того, каких размеров они были до начала термической обработки стали.

При дальнейшем нагреве стали наблюдается рост зерен аустенита. Этот процесс протекает неодинаково у различных сталей. У некоторых из них даже значительный нагрев выше критических температур не приводит к заметному росту зерен аустенита, у других же зерно аустенита заметно растет и при незначительном нагреве стали выше критических температур.

Склонность зерен аустенита к росту зависит от состава стали, в частности от количества содержащихся в ней углерода и других составляющих. Однако различная склонность к росту зерен аустенита наблюдается даже у сталей одинакового химического состава, но разных плавок. Это объясняется различным способом раскисления стали при ее выплавке.

В зависимости от склонности к росту зерен аустенита сталь делят на два типа: *наследственно крупнозернистую*, которая отличается повышенной склонностью к росту зерен, и *наследственно мелкозернистую*, которая до определенных температур отличается малой склонностью к росту зерен. Таким образом, наследственное зерно показывает, насколько велика склонность стали к перегреву, что очень важно при термической обработке. Существует несколько способов, с помощью которых можно определить наследственное зерно в стали. Наиболее простым является метод окисления: готовят шлиф и нагревают его в течение 3 час. при температуре 930° в печи, а затем охлаждают на воздухе и слегка полируют. Так как при нагреве границы зерен аустенита окисляются наиболее сильно, то после полировки она четко выделяется на светлом фоне шлифа в виде темной сетки. Выявленные таким путем зерна сравнивают со стандартной шкалой зернистости, имеющей восемь номеров (рис. 47). Сталь, которая подходит к номерам 1 - 4, считается наследственно крупнозернистой, а к номерам 5 - 8 – наследственно мелкозернистой. Основной целью нагрева стали при термической обработке чаще всего является получение мелкозернистого однородного аустенита. Знание наследственного зерна

стали позволяет установить правильный режим тепловой обработки для решения указанной задачи. От наследственного следует отличать действительное зерно стали. Действительным называется фактическое зерно, полученное в результате термической обработки стали. Свойства стали в конечном итоге определяются действительным зерном. При правильной термической обработке в наследственно крупнозернистой стали можно получить мелкое действительное зерно. Таким образом, нагрев — важная операция термической обработки, закладывающая основы для получения необходимой структуры и свойств стали.

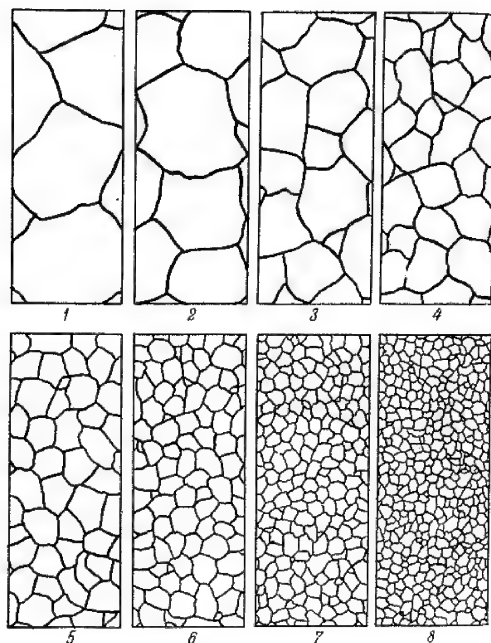


Рис. 47. Шкала размеров зерна.

ПРЕВРАЩЕНИЯ В СТАЛИ ПРИ ЕЕ НЕПРЕРЫВНОМ ОХЛАЖДЕНИИ.

Как известно, в результате нагрева сталь получает структуру аустенита. Поэтому основные превращения стали при охлаждении связаны с превращениями аустенита. Рассмотрим превращения, протекающие в эвтектоидной стали, содержащей 0,8% углерода при охлаждении.

Образование перлита. Из диаграммы состояния железоуглеродистых сплавов известно, что при медленном охлаждении стали, содержащей 0,8% углерода, при критической температуре A_{c1} (723°) происходит превращение аустенита в перлит. Напомним, что аустенит представляет собой твердый раствор углерода в $Fe\gamma$, а перлит — механическую смесь феррита ($Fe\alpha$) и цементита (Fe_3C). При превращении аустенита в перлит происходят следующие три процесса:

- 1) перестройка кристаллической решетки $Fe\gamma$ в $Fe\alpha$;
- 2) выделение цементита из кристаллической решетки;
- 3) разрастание образовавшегося цементита.

Чтобы все указанные процессы успели полностью завершиться, аустенит надо охлаждать со скоростью менее 1° в минуту. Такое медленное охлаждение необходимо потому, что при образовании перлита из аустенита важную роль играют диффузионные процессы, так как углерод перемещается на сравнительно большие расстояния. При более быстром охлаждении аустенита не все описанные процессы успеют произойти, и в результате получатся промежуточные между аустенитом и перлитом структуры — так называемые *переходные* структуры: сорбит, троостит и мартенсит. Превращение аустенита стали У8 в зависимости от скорости ее охлаждения показаны на рис. 48.

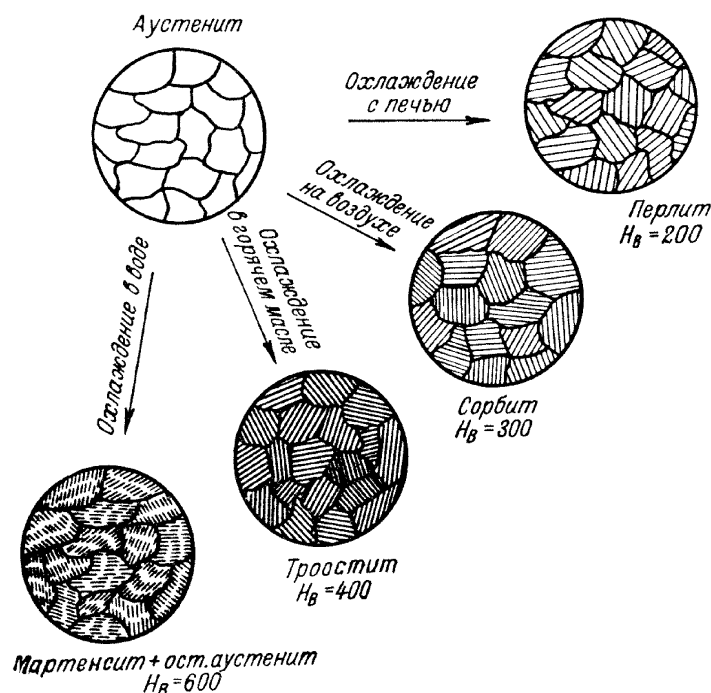


Рис. 48. Схема структурных превращений аустенита в стали У8 при различных скоростях охлаждения.

Образование сорбита. Если скорость охлаждения аустенита увеличить примерно до 5° в секунду, то при критической температуре A_{r1} (723°) не произойдет превращения аустенита в перлит. Аустенит сохранится не распавшимся до более низких температур ($600 - 650^\circ$). Такой аустенит называется *переохлажденным*. Так как в данном случае распад аустенита будет протекать при более низкой температуре ($600 - 650^\circ$), то не все процессы, происходящие при перлитном превращении, успеют завершиться — для этого не хватит времени. Перестройка кристаллической решетки и выделение цементита закончатся полностью, но процесс разрастания цементита будет протекать лишь частично. В результате получится структура, называемая *сорбитом*.

Эта структура, так же как и перлит, представляет собой механическую смесь феррита и цементита, но отличается от перлита более тонким строением пластинок цементита и меньшим расстоянием между ними. Поэтому изучение структуры сорбита следует производить при сравнительно больших увеличениях (в $500-600$ раз). Микроструктура сорбита представлена на рис. 49. От обычного перлита сорбит отличается более высокими значениями твердости ($H_B = 250 - 350$), упругости и прочности при достаточной вязкости.

Образование троостита. При увеличении скорости охлаждения стали до $40 - 60^\circ$ в секунду переохлажденный аустенит сохраняется не распавшимся до температур $400 - 550^\circ$. При распаде аустенита в интервале указанных температур успеют завершиться лишь два процесса: перестройка $Fe\gamma$ в $Fe\alpha$ и выделение цементита. Третий процесс — разрастание цементита — происходить не будет. В результате такого распада аустенита образуется механическая смесь феррита и цементита с более мелким строением, чем в сорбите. Такая структура называется трооститом. Следовательно, перлит, сорбит и троостит имеют одинаковую природу. Все они представляют собой механическую смесь феррита и цементита, но отличаются друг от друга размерами частиц. В троостите частицы настолько измельчены, что не различаются даже при больших увеличениях. Если троостит сочетается с другой структурой, то при травлении он всегда выделяется более темной окраской (рис. 50). Троостит обладает твердостью $H_B = 350 - 450$, высоким пределом упругости и сравнительно малой вязкостью. Критические температуры, при которых происходит распад переохлажденного аустенита в сорбит или троостит, принято обозначать A'_{r1} .

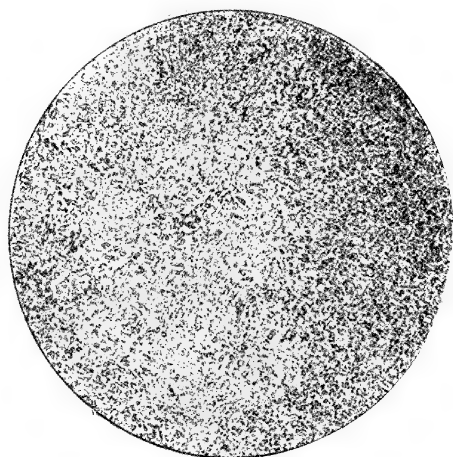


Рис. 49. Микроструктура сорбита ($\times 500$)

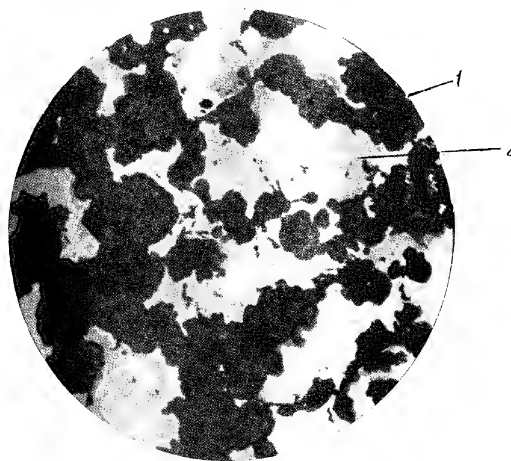


Рис. 50. Микроструктура троостита (1) и мартенсита (2) ($\times 500$)

Образование мартенсита. При увеличении скорости охлаждения стали до 120° в секунду и более переохлажденный аустенит сохранится нераспавшимся до температур $300 - 200^\circ$. Дальнейшее охлаждение такого аустенита не приводит к образованию механической смеси феррита и цементита, так как этот процесс связан с диффузией углерода, а при таких сравнительно низких температурах условия для диффузии неблагоприятны. В аустените,

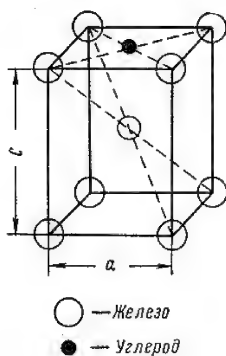


Рис. 51. Кристаллическая решетка.

переохлажденном до указанных температур, происходит только превращение $\text{Fe}\gamma$ в $\text{Fe}\alpha$, т. е. перегруппировка атомов и образование объемноцентрированного куба вместо гранецентрированного. Атомы углерода не успевают обособиться и образовать цементит, — они «застревают» в кристаллической решетке $\text{Fe}\alpha$ между атомами железа. Структура, полученная в результате такого превращения переохлажденного аустенита, называется *мартенситом*. Мартенсит представляет собой пересыщенный твердый раствор углерода в $\text{Fe}\alpha$. Пересыщенным он называется потому, что в кристаллической решетке $\text{Fe}\alpha$ «насильственно» растворено значительное количество углерода, в то время как $\text{Fe}\alpha$ способно при комнатной температуре растворить всего 0,006% углерода. Это обстоятельство вызывает искажение

кристаллической решетки мартенсита: отношение сторон ее не равно единице, как у куба, а одна сторона несколько вытянута, т. е. отношение $c:a > 1$ (рис. 51). Это отношение тем больше, чем больше в стали углерода. Такая искаженная кристаллическая решетка называется *тетрагональной*.

Таким образом, мартенсит, так же как и аустенит, является твердым раствором, но их принципиальное различие состоит в том, что в аустените атомы расположены в виде гранецентрированного куба, а в мартенсите в виде несколько искаженного центрированного куба. Вследствие того что в мартенсите атомы углерода как бы заклинены между атомами железа, они вызывают большие внутренние напряжения. Поэтому мартенсит обладает большой твердостью ($H_B = 600 - 650$, а $H_{RC} = 60$) наряду со значительной хрупкостью. Твердость мартенсита зависит от содержания в нем углерода. Под микроскопом мартенсит наблюдается в виде штрихов и игл различных размеров (как прямолинейных, так и зазгагообразных). Иногда эти иглы настолько тонки, что не выявляются травлением. Такой мартенсит называют бесструктурным. Микроструктура мартенсита представлена на рис. 52. Мартенсит является неустойчивой структурой. Углерод, насильственно «втиснутый» в кристаллическую решетку, стремится при первом удобном случае «покинуть» ее. Поэтому нагрев мартенсита и даже длительное пребывание при комнатной температуре вызывают

изменения в его структуре. Критические температуры, при которых происходит превращение аустенита в мартенсит, обозначают буквой М. Различают критическую температуру M_n , которая соответствует началу превращения аустенита в мартенсит, и температуру M_k , при которой это превращение заканчивается. Положение температур М и M_k зависит от химического состава стали и не зависит от скорости ее охлаждения. Влияние углерода на положение температур M_n и M_k показано на рис. 53. Как видно из представленной диаграммы, температуры M_n и M_k понижаются с увеличением содержания в стали углерода.

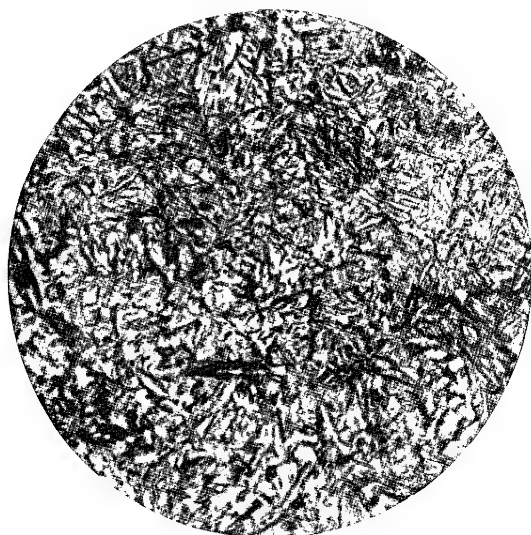


Рис. 52. Микроструктура мартенсита ($\times 500$)

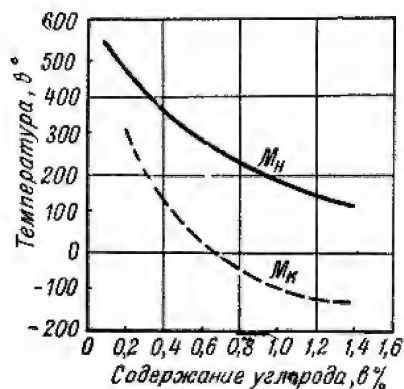


Рис. 53. Влияние углерода на положение температур M_n и M_k .

Остаточный аустенит. Процесс превращения аустенита в мартенсит не протекает до конца. В быстроохлажденной стали наряду с мартенситом всегда имеется то или иное количество не превращенного аустенита. Такой аустенит называют остаточным. Наличие остаточного аустенита объясняется следующим. Переход аустенита в мартенсит сопровождается увеличением объема. Мартенсит занимает больший объем, чем аустенит, из которого он образовался. Поэтому когда в стали остается небольшое количество аустенита, он подвергается со стороны мартенсита всестороннему сжатию, ввиду чего превращение аустенита в мартенсит прекращается. Кроме того, наличие остаточного аустенита связано с положением точки M_k : чем ниже температура конца мартенситного превращения, тем больше будет в стали остаточного аустенита. Как видно из диаграммы, представленной на рис. 53, у высокоуглеродистых сталей температура M_k лежит значительно ниже комнатной. Это имеет место и у ряда специальных сталей. Такие стали при быстром охлаждении до комнатной температуры не достигают температуры конца мартенситного превращения и, следовательно, в их структуре остается сравнительно большое количество остаточного аустенита (до 30%). Быстро охлажденные малоуглеродистые стали содержат незначительное количество остаточного аустенита (2 – 4%). Наличие большого количества остаточного аустенита для большинства сталей нежелательно (хотя для отдельных групп инструментальной стали это является положительным фактором).

ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ АУСТЕНИТА.

Выше были рассмотрены превращения, происходящие в аустените при непрерывном охлаждении вплоть до комнатной температуры стали, нагретой выше критических температур. Работами С. С. Штейнберга и других исследователей установлено, что скорость охлаждения играет основную роль при получении переохлажденного аустенита. Чем больше скорость охлаждения, тем ниже температура, до которой аустенит сохраняется не

распавшимся. Получение той или иной структуры при термической обработке зависит от температуры, до которой переохлажден аустенит. Так, например, если аустенит углеродистой стали переохладить (т. е. сохранить нераспавшимся) до температуры ниже 300° , то мы получим структуру мартенсита. Если же его переохладить только до температуры 650° , то получим структуру сорбита и т. д. Непосредственный же переход аустенита в ту или иную структуру не требует большой скорости охлаждения, а в ряде случаев может происходить и при постоянной температуре. Превращение аустенита в ту или иную структуру, протекающее при постоянной температуре, называется *изотермическим*. Практически такое превращение осуществляется следующим образом. Изделие, нагретое до определенной критической температуры, погружают в ванну с расплавленной солью, имеющей необходимую температуру. В этой ванне изделие выдерживают определенное время, в течение которого происходит превращение аустенита в требуемую структуру. Затем изделие извлекают из ванны и охлаждают на воздухе или в воде до комнатной температуры. В зависимости от температуры соляной ванны получают ту или иную структуру.

При изотермическом превращении аустенита можно получить перлит, сорбит или троостит. Структуру мартенсита получить таким путем нельзя, так как он образуется только в интервале температур от M_n до M_s . Это объясняется механизмом образования мартенсита. Переход аустенита в мартенсит происходит путем мгновенного образования игл мартенсита без их дальнейшего роста. Поэтому, если охлаждение приостановить, то прекратится процесс образования мартенсита. Превращение же аустенита в перлит, сорбит и троостит протекает по-иному: сначала образуется центр будущего зерна, а затем оно постепенно разрастается даже при постоянной температуре.

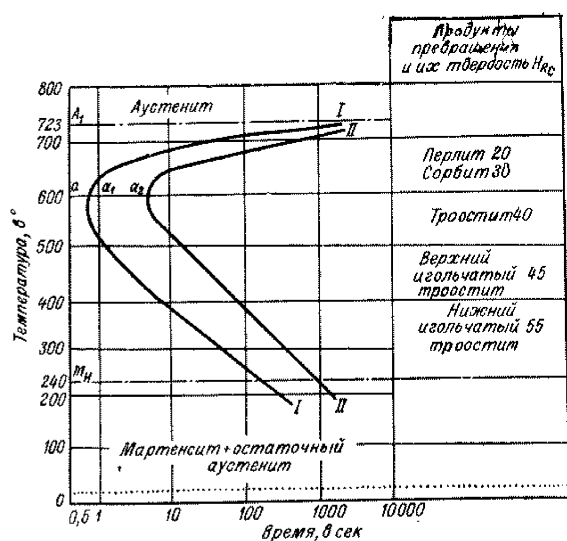


Рис. 54. Диаграмма изотермического превращения аустенита стали, содержащей 0,8% углерода.

углерода, представлена на рис. 54. Кривая I характеризует устойчивость переохлажденного аустенита при различных температурах. Одновременно она указывает также момент начала изотермического превращения аустенита. Кривая II характеризует конец изотермического превращения аустенита при различных температурах. Таким образом, пользуясь диаграммой, можно определить для данной стали при заданной температуре время, в течение которого аустенит не будет претерпевать превращений, а также время, в продолжение которого будет происходить процесс изотермического превращения аустенита. Так, например, для стали, содержащей 0,8% углерода (см. рис. 54), при температуре 600° устойчивость аустенита будет характеризоваться отрезком aa_1 , что соответствует примерно 0,9 сек. Время изотермического превращения аустенита при указанной температуре определяется отрезком a_1a_2 , что

Для каждой стали можно построить по опытным данным диаграмму изотермического превращения аустенита: по вертикальной оси откладывают температуру переохлажденного аустенита, а по горизонтальной — время. Изотермическое превращение переохлажденного аустенита может протекать только в определенном интервале температур — от A_1 до M_n . При температурах выше A_1 (723°) аустенит устойчив и не претерпевает превращений; при температурах ниже M_n изотермическое превращение становится невозможным вследствие высокой степени переохлаждения аустенита. Диаграмма изотермического превращения аустенита стали, содержащей 0,8%

соответствует примерно 6 – 7 сек. Следовательно, если сталь, содержащую 0,8% углерода, выдерживать при температуре 600° более 0,9 сек., то начнется превращение аустенита в троостит. Это превращение будет продолжаться 6 – 7 сек., после чего сталь можно охладить на воздухе или в другой среде. Так же по диаграмме можно определить устойчивость аустенита и время его изотермического превращения и при других температурах. Следует отметить, что устойчивость аустенита является важной характеристикой стали. Она определяет в основном условия закалки стали. Устойчивость аустенита не одинакова при различных температурах. У каждой стали имеется определенная температура, при которой аустенит обладает наименьшей устойчивостью. Для рассматриваемой стали эта температура равна 550°.

Диаграмма изотермического превращения аустенита имеет следующие области: выше температуры A_1 – аустенит; ниже температуры M_n – мартенсит и остаточный аустенит; между температурами A_1 и M_n (723 – 240°) – переохлажденный аустенит левее линии I и перлит, сорбит, троостит и игольчатый троостит правее линии II эти структуры расположены в определенном интервале температур.

Как видно из диаграммы изотермического превращения аустенита, ниже перегиба кривой образуется структура, которая называется *игольчатым трооститом*. Эта структура, как и обычный троостит, представляет собой механическую смесь феррита и цементита, но имеет игольчатое строение, аналогичное мартенситу. Твердость игольчатого троостита выше чем у обычного, но ниже чем у мартенсита ($H_B = 500$; $H_R = 50$).

Диаграммы изотермического превращения аустенита имеют большое теоретическое и практическое значение. Они просто и наглядно объясняют сложные процессы вторичной кристаллизации стали при любых скоростях охлаждения и позволяют определить время процесса — очень важный фактор, который отсутствует на диаграмме состояния железоуглеродистых сплавов. Пользуясь этими диаграммами, можно осуществлять современные прогрессивные методы термической обработки стали – изотермическую закалку и изотермический отжиг.

Глава VI. ОТЖИГ И НОРМАЛИЗАЦИЯ СТАЛИ. ХАРАКТЕРИСТИКА ОТЖИГА И ЕГО НАЗНАЧЕНИЕ.

Отжигом называют такой вид термической обработки, когда сталь нагревают до определенной температуры, выдерживают при этой температуре некоторое время, а затем медленно охлаждают (чаще всего вместе с печью). В результате отжига в стали получаются равновесные структурные составляющие в соответствии с диаграммой состояния железоуглеродистых сплавов. С помощью отжига можно изменить форму и размеры зерен структуры стали, устранить неоднородность ее по химическому составу, уменьшить вредные внутренние напряжения, устранить наклеп и благодаря этому значительно улучшить свойства стали. Отжиг чаще всего является предварительной операцией термической обработки, цель которой либо устранение дефектов предыдущих операций (литья,ковки и др.), либо подготовка структуры для последующей обработки резанием или закалки. В зависимости от того какую цель преследует отжиг, устанавливают различные режимы его проведения (температуру нагрева, время выдержки, скорость охлаждения).

ОТЖИГ С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ МЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ.

Отжигу с указанной целью подвергают изделия (чаще всего из конструкционной стали), перегретые при обработке давлением или при термической обработке, а также литые. Мелкозернистое строение обеспечивает лучшую вязкость и пластичность стали и уменьшает опасность аварий и поломок изделия при эксплуатации. Чтобы получить мелкое зерно вместо крупного, нужно произвести перекристаллизацию стали, т. е. получить путем нагрева аустенит мелкозернистого строения. Из предыдущего известно, что в стали, нагретой до

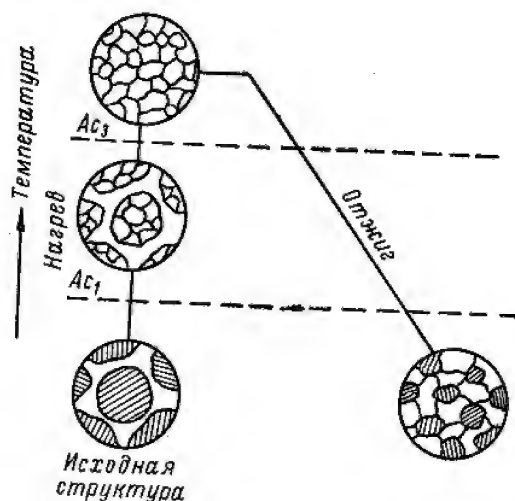


Рис. 55. Схема перекристаллизации стали при отжиге для получения мелкозернистой структуры.

критической температуры A_{c3} , образуется мелкозернистый аустенит даже в том случае, если исходная структура была крупнозернистой. Отжиг для получения мелкозернистой структуры осуществляют следующим образом. Изделие нагревают до температуры $A^c + 30 \pm 50^\circ$, чтобы получить однородный по составу аустенит. После определенной выдержки при указанной температуре изделие охлаждают вместе с печью до температуры $200 - 500^\circ$. Дальнейшее охлаждение изделия до комнатной температуры можно производить на воздухе. Схема перекристаллизации стали при отжиге, представлена на рис. 55. При отжиге для получения мелкозернистой структуры следует тщательно контролировать температуру во избежание перегрева изделия. Известно, что при значительном увеличении температуры

выше A_{c3} аустенит получит крупнозернистое строение, и тогда цель отжига не будет достигнута. Температуры нагрева конструкционных углеродистых сталей при указанном отжиге приведены в табл. 5.

Таблица 5 Температуры нагрева конструкционной углеродистой стали при отжиге для получения мелкозернистой структуры.

Марка стали.	Температура отжига. ($^\circ$)
Ст. 1, Ст. 2, Ст. 3, 10, 15	900 – 910
Ст. 4, 20, 25	860 – 880
Ст. 5, 30, 35	830 – 850
Ст. 6, 40, 45, 50	820 – 840

У стальных отливок процесс перекристаллизации протекает труднее, чем у ковальной и катаной стали, поэтому выдержка стальных отливок при температуре отжига должна быть более длительной. Охлаждение их производится со скоростью $80 - 120^\circ$ в час, т. е. несколько медленнее, чем кованых и катаных изделий, которые можно охлаждать со скоростью $100 - 200^\circ$ в час. Если и при этих условиях не удастся получить мелкозернистую структуру, то применяют двойной отжиг, причем первый отжиг производится при повышенной температуре (950°), а второй — при температуре, указанной в табл. 5. Механические свойства литой стали до и после отжига приведены в табл. 6.

Таблица 6. Изменение механических свойств литой стали, содержащей 0,4% углерода, в результате отжига для получения мелкозернистой структуры.

Состояние стали	Предел прочности (в кг/мм^2)	Предел текучести (в кг/мм^2)	Удлинение (в %)	Сужение (в %)	Ударная вязкость (в кг/см^2)
До отжига	55 – 60	28 – 32	10 – 12	15 – 20	2 – 4
После отжига	50 – 55	32 – 35	15 – 18	20 – 25	5 – 8

Из табл. 6 видно, что особенно благоприятное влияние отжиг оказывает на ударную вязкость стали. Микроструктура стали 35 до и после отжига показана на рис. 56.

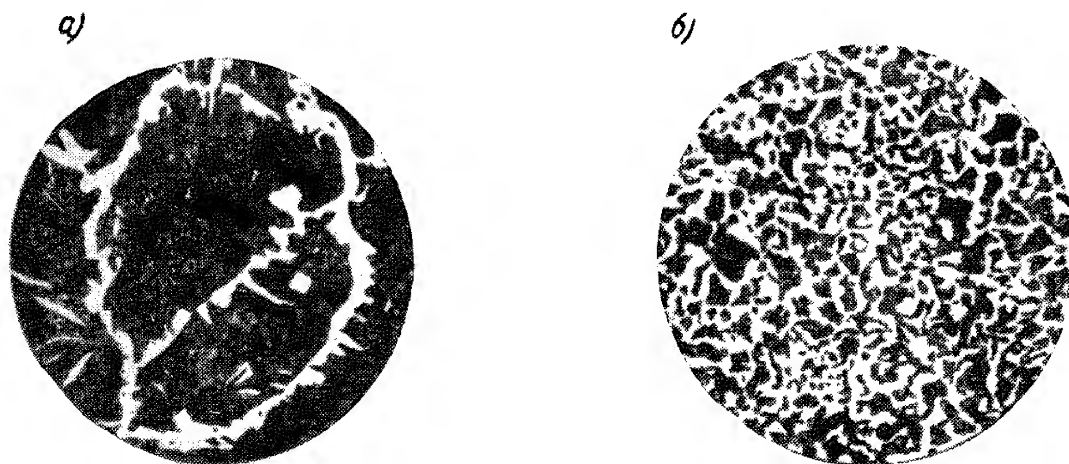


Рис. 56. Структура стали 35 ($\times 100$): а – до отжига; б – после отжига.

В настоящее время при отжиге углеродистой стали широко используется метод быстрого нагрева изделий: рекомендуется нагревать изделия с наибольшей скоростью, которая может быть достигнута. Высказываемые в литературе опасения

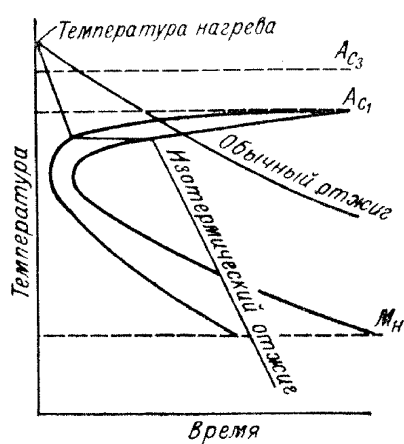


Рис. 57. Схема изотермического и обычного отжига.

о возможности появления трещин при ускоренном нагреве практически, как правило, не подтверждаются. Продолжительность отжига может быть сокращена также путем применения изотермического отжига, основанного на способности переохлажденного аустенита претерпевать превращения при постоянной температуре. При изотермическом отжиге изделия нагревают до требуемой температуры отжига ($A_{c3} + 20 \pm 30^\circ$) и после некоторой выдержки переносят в другую печь (или соляную ванну) с температурой $650 - 680^\circ$ или охлаждают в той же печи до указанной температуры. При температуре $650 - 680^\circ$ изделия выдерживают в течение времени, необходимого для полного превращения аустенита в перлит.

Время выдержки устанавливается по диаграмме изотермического превращения аустенита для данной стали; оно колеблется обычно в пределах от 2 до 5 час. По окончании выдержки изделия вынимают из печи и охлаждают на воздухе. Продолжительность изотермического отжига в 2 – 3 раза меньше обычного, кроме того, структура стали получается более однородной, так как процесс превращения аустенита протекает при постоянной температуре. Схема изотермического отжига стали приведена на рис. 57. Изотермический отжиг применяется в основном для легированной стали. Следует, однако, иметь в виду, что после изотермического отжига твердость стали получается более высокой, чем при обычном отжиге.

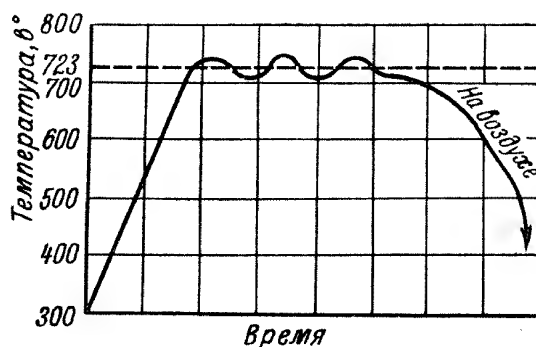


Рис. 58. График маятникового отжига эвтектоидной стали.

ОТЖИГ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗЕРНИСТОГО ЦЕМЕНТИТА.

Этот вид отжига преследует цель изменить строение цементита: вместо пластинчатого

получить цементит зернистой формы (см. рис. 33 и 34). Такому отжигу в основном подвергаются инструментальные стали. Что же достигается изменением формы цементита? Во-первых, уменьшается твердость стали и, следовательно, облегчается ее обработка на станках. Твердость по Бринеллю (H_B) эвтектоидной стали с зернистым цементитом на 50 – 60 единиц меньше, чем стали с пластинчатым цементитом. При пластинчатом цементите режущий инструмент должен перерезать твердые пластинки цементита, а при зернистом цементите инструмент чаще всего проходит по мягкому ферриту. Повышается также режущая способность инструмента, так как при зернистой форме цементит более равномерно распределяется в структуре закаленной стали. Во-вторых, сталь с зернистым цементитом менее склонна к трещинам и короблению при закалке. Отжиг с целью получения зернистого цементита осуществляется по следующему режиму: сталь нагревается до температуры $A_{c1} + 20 \pm 30^\circ$ (примерно до 750°), выдерживается при этой температуре в течение 4 – 10 час. и затем очень медленно (со скоростью не более $40 - 50^\circ$ в час) охлаждается с печью до температуры $600 - 650^\circ$. Дальнейшее охлаждение до комнатной температуры можно производить на воздухе. Следует иметь в виду, что при нагреве стали выше температуры $A_{c1} + 20 \pm 30^\circ$ цементит может раствориться в аустените, и тогда цель отжига не будет достигнута, так как после охлаждения получится цементит пластинчатой формы. Для ускорения процесса отжига иногда применяют так называемый *маятниковый* отжиг: сталь нагревается до температуры 750° и после небольшой выдержки медленно охлаждается вместе с печью до $680 - 700^\circ$, затем снова нагревается до 750° и опять охлаждается до $680 - 700^\circ$. Так делают 3 – 4 раза. График маятникового отжига приведен на рис. 58. Процесс маятникового отжига сложнее обычного, но зато он дает значительную экономию времени.

ОТЖИГ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ СТАЛИ.

Этому виду отжига обычно подвергаются стальные слитки крупных размеров, претерпевающие при затвердевании значительную ликвацию. *Ликвацией* называется неоднородность стали по химическому составу как в отдельных частях слитка (зональная ликвация), так и внутри отдельных кристаллов (внутрикристаллическая, или дендритная, ликвация). В стали особенно сильно ликвируют сера и фосфор. Ликвация неблагоприятно влияет на свойства стали, особенно заметно она снижает ударную вязкость поперечных образцов. Образовавшаяся зональная ликвация практически не может быть устранена. Внутрикристаллическую ликвацию можно значительно ослабить при помощи отжига, который осуществляется по следующему режиму: сталь нагревают до температуры $1100 - 1150^\circ$, выдерживают при этой температуре 10 – 15 час. и затем медленно охлаждают с печью до 200° ; дальнейшее охлаждение производят на воздухе. При высокой температуре атомы серы, углерода и других элементов стали становятся более подвижными и медленно перемещаются от зон, где они содержатся в большом количестве, к зонам, где этих элементов меньше. Таким образом, при указанном отжиге протекает процесс диффузии, в результате которого происходит выравнивание химического состава стали. Поэтому такой отжиг называют еще *диффузионным*. В результате длительной выдержки при высокой температуре сталь приобретает крупнозернистое строение, что легко устраняется в процессе дальнейшейковки или прокатки слитка. Если химическая неоднородность стали не очень значительна, то она устраняется при горячей обработке слитка давлением без предварительного его отжига. Диффузионный отжиг находит применение в основном на металлургических заводах, где получают стальные слитки. Такому отжигу подвергаются также и некоторые стальные отливки, однако после диффузионного отжига они должны непременно подвергаться повторному отжигу для придания стали мелкозернистой структуры.

ОТЖИГ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТАЛИ.

Напряжения, которые образуются в изделиях без воздействия на них внешних сил, называются *внутренними напряжениями*. Образование внутренних напряжений может происходить при затвердевании отливок, при сварке и других процессах. Очень часто внутренние напряжения возникают при термической обработке изделия вследствие неравномерного нагревания его и охлаждения. При неравномерном охлаждении наружные слои изделия, охлаждающиеся быстрее, будут уменьшаться в объеме и сжимать внутренние слои, которые еще не успели остыть и поэтому будут препятствовать сжатию наружных слоев. Особенно большие внутренние напряжения возникают при термической обработке изделий крупных сечений и сложной формы. Такое напряженное состояние металла нежелательно, так как достаточно внутренним напряжениям в какой – либо небольшой зоне превысить предел прочности стали, как образуется трещина. Вредные внутренние напряжения можно снять с изделия при помощи отжига. Такой отжиг не требует высокой температуры нагрева. Изделие нужно нагреть до такой температуры, при которой проявились бы пластические свойства стали: сжатые слои растянулись, а растянутые – сжались. Чтобы эти процессы совершились, достаточно нагреть изделие до температуры $500 - 600^{\circ}$, выдержать некоторое время при этой температуре и затем медленно охладить вместе с печью (чтобы не возникли снова внутренние напряжения). Для сокращения времени выдержки практически отжиг ведут при температурах $650 - 680^{\circ}$. Таким образом, отжиг для снятия внутренних напряжений производится при температурах ниже критической A_{c1} (723°), следовательно, структурных превращений при этом отжиге не происходит. Этот вид отжига часто называют *низким отжигом*, а иногда *высоким отпуском*. При низком отжиге в связи со снятием внутренних напряжений достигается некоторое понижение твердости изделия. Поэтому таким видом отжига часто пользуются для уменьшения твердости изделий с целью улучшения их обрабатываемости на станках. Следует иметь в виду, что если сталь подвергается отжигу для получения мелкозернистой структуры или зернистого цементита, то для устранения внутренних напряжений не требуется специального отжига. В процессе проведения указанных видов отжига попутно снимутся и внутренние напряжения.

ОТЖИГ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ НАКЛЕПА.

Стальные заготовки и изделия тонкого сечения часто изготавливают путем штамповки, прокатки или волочения в холодном состоянии. При обработке стали давлением в холодном состоянии происходит ее *наклеп* – в ней образуются значительные внутренние напряжения, сталь становится весьма прочной и твердой и в то же время очень хрупкой. Структура наклепанной стали состоит из вытянутых в одном направлении зерен; кристаллическая решетка такой стали искажена. Чтобы устранить вредное состояние наклепа, нужно изменить структуру стали, устранить искажение кристаллической решетки и вместо вытянутых зерен получить зерна равноосные (примерно одинаковые оси вдоль и поперек зерна).

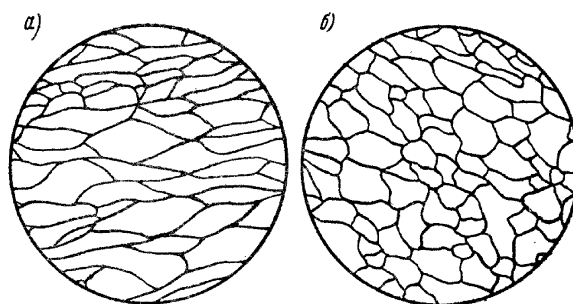


Рис. 59. Схема изменения микроструктуры стали в результате рекристаллизационного отжига: *а* – до отжига; *б* – после отжига.

Этот процесс восстановления структуры стали называется *рекристаллизацией*, а вид термической обработки, при помощи которой этот процесс осуществляется, – *рекристаллизационным отжигом*. Такой отжиг производится при температуре 680 – 700°. После непродолжительной выдержки изделия при указанной температуре (для прогрева по всему сечению) производится охлаждение его на воздухе. Изменение структуры стали в результате рекристаллизационного отжига схематично представлено на рис. 59. В результате такой термической обработки уменьшаются твердость и прочность стали, но зато повышаются ее вязкость и пластичность.

ОТЖИГ В БЕЗОКИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ (светлый отжиг).

При нагревании стальных изделий в обычных пламенных и электрических печах происходит взаимодействие поверхности изделия с кислородом нагревающей среды. В результате этого взаимодействия протекают два вредных процесса: окисление железа, т. е. образование окалины, и обезуглероживание, т. е. выгорание углерода с поверхности изделия. Чем выше температура нагрева и длительнее выдержка изделия при этой температуре, тем большее распространение получают указанные явления. При образовании окалины теряется от 1 до 3% металла, кроме того, требуются дополнительные затраты на удаление ее путем травления или обдувки изделия в пескоструйном аппарате. Обезуглероживание поверхности особенно нежелательно у инструментальной стали. Обезуглероженную поверхность, глубина которой достигает 1 – 1,5 мм, приходится удалять.

Чтобы избежать окисления и обезуглероживания поверхностного слоя металла, нагрев стальных изделий должен производиться в так называемой нейтральной среде, в которой содержится минимальное количество избыточного воздуха. Если атмосфера печи нейтральна, то она не воздействует на поверхность металла и не изменяет ее. При отжиге в такой среде окалины не образуются и даже при высоких температурах поверхность изделия остается чистой. Отжиг в такой среде называют *светлым отжигом*. Светлый отжиг осуществляется в электрических или муфельных печах с наружным обогревом муфеля и с герметически закрывающимся рабочим пространством, которое во время работы печью заполняется защитным газом. Для создания в печи нейтральной атмосферы надо иметь для данной температуры и данного сорта стали определенное соотношение между газами: $\text{CO}_2 : \text{CO}$; $\text{H}_2\text{O} : \text{H}_2$; $\text{CH}_4 : \text{H}_2$. Это достигается при использовании древесноугольного генераторного газа, а также продуктов неполного сжигания природного (саратовского) газа. В качестве нейтральной среды могут быть использованы также газы, полученные путем крекинга (разложения) керосина или мазута в присутствии воздуха или воды. Предохранить изделия от окисления можно путем создания в печи газовой завесы, препятствующей проникновению в рабочее пространство печи воздуха. Схема устройства такой печи приведена на рис. 60. В камеру 1, где происходит горение, подводятся воздух и небольшое количество горючего газа. Продукты горения выходят через щель 3 в камеру 2 и образуют перед рабочим пространством печи дымовую завесу. В качестве нейтральной среды могут использоваться расплавленные соли. Такие соляные ванны необходимо периодически раскислять. Термическая обработка стальных изделий в безокислительных средах получает всё более широкое распространение, так как дает экономию металла и улучшает качество изделий. Этому виду обработки подвергаются стальные ленты, жёсть, листовая сталь для автомобилей и другие изделия.

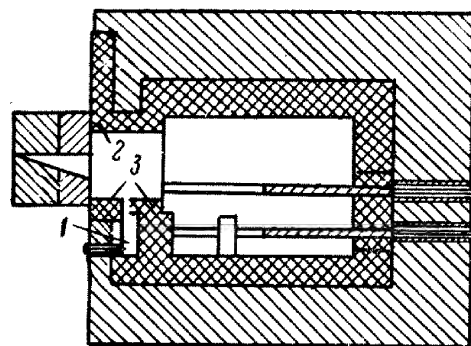


Рис. 60. Схема печи с газовой завесой.

НОРМАЛИЗАЦИЯ СТАЛИ.

Нормализацией называют такой вид термической обработки, когда сталь нагревают на 30 – 50° выше верхних критических температур A_{c3} или A_{cm} и после выдержки при этих температурах охлаждают на спокойном воздухе. Таким образом, от отжига нормализация отличается более быстрым охлаждением изделия (примерно в 2 раза). Нормализация является более дешевой операцией, чем отжиг, так как печи используются только для нагрева и выдержки изделия при температуре нагрева, а охлаждение производится вне печи. Кроме того, нормализация ускоряет процесс термической обработки. Таким образом, отжиг выгодно заменять нормализацией. Однако это не всегда возможно, так как у некоторых сталей твердость после нормализации возрастает более значительно, чем при отжиге. Малоуглеродистые стали рекомендуется подвергать нормализации, так как у них практически отсутствует разница в свойствах после отжига и нормализации. Стали, содержащие свыше 0,4% углерода, после нормализации получают повышенную твердость. Такие стали лучше отжигать. На практике и такие стали часто подвергают нормализации вместо отжига, а затем высокому отпуску при температурах 650 – 700° для уменьшения твердости. Нормализацию применяют для получения мелкозернистой структуры в отливках и поковках, для устранения внутренних напряжений и наклепа, для подготовки структуры стали к закалке. Для некоторых изделий нормализация является не предварительной, а окончательной операцией термической обработки. В этом случае после нормализации изделия подвергают высокому отпуску для снятия внутренних напряжений, образовавшихся при охлаждении изделия на воздухе.

Глава VII. ЗАКАЛКА УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ. СУЩНОСТЬ И НАЗНАЧЕНИЕ ЗАКАЛКИ.

Закалка – самый распространенный вид термической обработки. Закаливается валы, шестерни, пружины, штампы, зубила, резцы, фрезы и другие изделия и инструменты. Столь широкое распространение этого вида термической обработки объясняется тем, что при помощи закалки и последующего отпуска можно изменить свойства стали в очень широком диапазоне. В гл. V были рассмотрены превращения, которые протекают в стали, имеющей структуру аустенита, при ее охлаждении с различной скоростью. Закалка стали основана именно на этих превращениях. Операция закалки состоит в том, что стальные изделия нагревают немного выше критических температур A_{c1} , A_{c3} а иногда и A_{cm} и затем быстро охлаждают. В качестве охлаждающей среды применяют воду, масло и растворы солей. Целью закалки чаще всего является повышение твердости и прочности стальных изделий. При закалке имеют место понижение пластичности и вязкости стали, однако эти качества можно восстановить при последующем отпуске.

Как известно из предыдущего, при увеличении скорости охлаждения аустенита можно получить структуры сорбита, троостита или мартенсита. При закалке, как правило, стремятся получить структуру мартенсита, которая обеспечивает максимальную твердость стали. Структуру сорбита или троостита более целесообразно получать путем отпуска закаленной стали. Закалка является наиболее сложным видом термической обработки, так как она протекает при очень больших скоростях охлаждения, что связано с образованием значительных внутренних напряжений в металле. Поэтому даже небольшие отклонения от установленных режимов обработки приводят к браку в изделии. Существенное влияние на результаты закалки оказывают температура нагрева и скорость охлаждения изделия.

ТЕМПЕРАТУРА НАГРЕВА СТАЛИ ПРИ ЗАКАЛКЕ.

При закалке стали режим нагрева имеет решающее значение. Чтобы закалить сталь, необходимо нагреть ее до определенной температуры. Так, например, если углеродистую

сталь при закалке нагреть ниже критической температуры A_{c1} , то твердость ее по сравнению с исходным состоянием мало изменится, и в структуре такой стали мартенсита не будет. Это объясняется тем, что сталь была недостаточно нагрета. Структуру мартенсита можно получить только в результате превращения аустенита. В рассмотренной выше стали при нагреве не был получен аустенит, поэтому при охлаждении и не произошло образования мартенсита. Следовательно, чтобы закалить сталь, она должна быть нагрета выше критической температуры A_{c1} . Температура нагрева стали при закалке определяется прежде всего содержанием в ней углерода. Интервал закалочных температур сталей с различным содержанием углерода приведен на рис. 61. Как видно из представленного рисунка, доэвтектоидные стали при закалке нагревают до температуры на $40 - 50^\circ$ выше критической температуры A_{c3} . При таком нагреве сталь получит структуру аустенита, который при последующем быстром охлаждении превратится в мартенсит. Такая закалка называется *полной закалкой*.

Заэвтектоидные стали при закалке нагревают до температуры на $40 - 50^\circ$ выше критической температуры A_{c1} , т. е. до $760 - 780^\circ$. При этой температуре структура стали будет состоять из аустенита и цементита. В результате быстрого охлаждения стали аустенит перейдет в мартенсит, а цементит сохранится в структуре закаленной стали, так как он не претерпевает превращений при охлаждении. Следовательно, после закалки сталь будет иметь структуру мартенсита и цементита. Такая закалка называется *неполной*. Почему же неполная закалка рекомендуется для заэвтектоидной стали и недопустима для доэвтектоидной?

Если доэвтектоидную сталь подвергнуть неполной закалке, т. е. нагреть выше температуры A_{c1} но ниже A_{c3} , то в ее структуре наряду с аустенитом будет и феррит. После закалки структура такой стали будет состоять из мартенсита и мягкого феррита. Наличие в закаленной стали феррита понижает не только ее твердость и прочность, но и пластические свойства. Заэвтектоидная сталь после неполной закалки имеет в своей структуре твердый цементит, который не только не снижает твердость, а, наоборот, даже улучшает износостойкость стали. Полная же закалка заэвтектоидной стали, т. е. нагрев ее до температуры выше A_{cm} опасна и не нужна. Твердость стали при этом не увеличивается, но зато создаются благоприятные условия для перегрева, образования закалочных трещин и обезуглероживания стали. Нагрев изделий при закалке может производиться в тех же печах, что и при отжиге. Мелкие детали могут нагреваться в соляных ваннах. Время выдержки стальных изделий при температуре закалки должно быть достаточным для того, чтобы обеспечить образование однородного аустенита по всему сечению изделия. Чем больше толщина и вес изделия, тем продолжительнее должна быть выдержка. Однако чрезмерно большая выдержка может привести к росту зерен аустенита. Для изделий из углеродистой стали выдержка при температуре закалки устанавливается примерно в следующих пределах: при толщине $25 - 50$ мм – 30 мин., $50 - 75$ мм – 45 мин., $75 - 100$ мм – 60 мин.

ОХЛАЖДЕНИЕ СТАЛИ ПРИ ЗАКАЛКЕ.

Критическая скорость закалки. Скорость охлаждения при закалке должна обеспечить получение в стали структуры мартенсита. Для каждой стали существует так называемая критическая скорость закалки, которая и определяет условия охлаждения изделия при закалке. Критической скоростью закалки называется наименьшая скорость охлаждения, которая необходима для переохлаждения аустенита до температуры мартенситного превращения. Фактическая скорость охлаждения должна быть не меньше, чем критическая скорость закалки. Если фактическая скорость охлаждения при закалке меньше критической, то в стали не будет получен мартенсит. Структура стали в этом случае будет состоять из троостита или сорбита. Однако не следует при закалке охлаждать сталь со скоростью, значительно превышающей критическую скорость. Хотя при таком охлаждении сталь будет иметь структуру мартенсита, но чрезмерно резкая закалка может привести к весьма значительным внутренним напряжениям и трещинам.

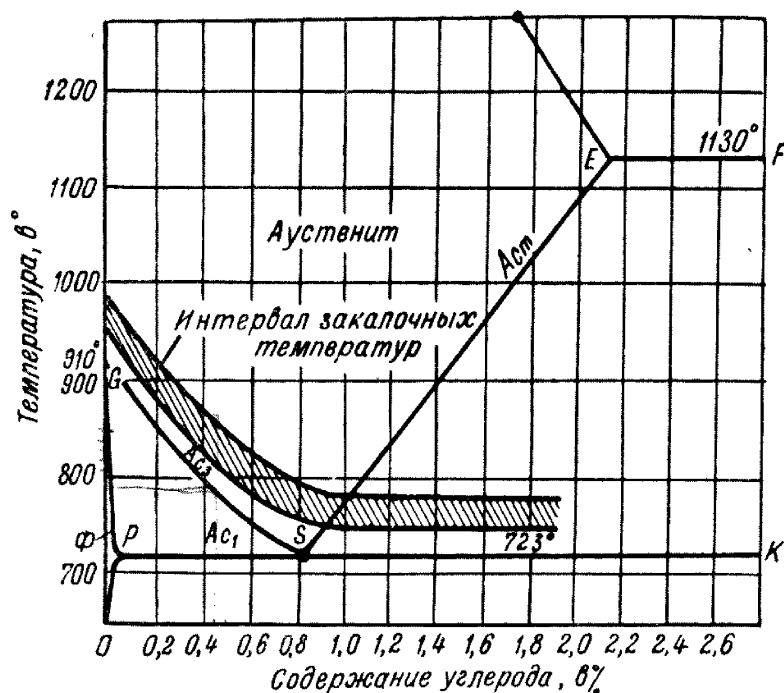


Рис. 61. Интервал закалочных температур для сталей с различным содержанием углерода.

Критической скоростью заковки называется наименьшая скорость охлаждения, которая необходима для переохлаждения аустенита до температуры мартенситного превращения. Фактическая скорость охлаждения должна быть не меньше, чем критическая скорость заковки. Если фактическая скорость охлаждения при заковке меньше критической, то в стали не будет получен мартенсит. Структура стали в этом случае будет состоять из троостита или сорбита. Однако не следует при заковке охлаждать сталь со скоростью, значительно превышающей критическую скорость. Хотя при таком охлаждении сталь будет иметь структуру мартенсита, но чрезмерно резкая заковка может привести к весьма значительным внутренним напряжениям и трещинам.

Критическая скорость заковки у различных сталей не одинакова и колеблется в очень больших пределах (в зависимости от химического состава стали). Имеются специальные стали, у которых критическая скорость заковки составляет 2 - 3° в секунду, а у некоторых сталей она достигает 1200° в секунду. Чем ниже критическая скорость заковки, тем легче заковать сталь. У всех углеродистых сталей критическая скорость заковки очень велика. Влияние углерода на критическую скорость заковки стали показано на рис. 62. Как видно из приведенной диаграммы, наименьшую критическую скорость заковки имеет сталь, содержащая 0,8% углерода. Но и у этой стали критическая скорость очень велика – около 160° в секунду. На критическую скорость заковки оказывают влияние и другие элементы, содержащиеся в стали, что будет рассмотрено в дальнейшем. Критическая скорость заковки – важная характеристика, без которой нельзя установить правильный режим заковки стали.

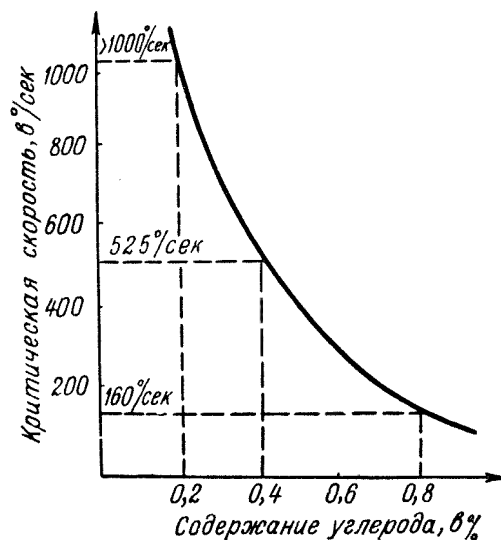


Рис. 62. Влияние углерода на критическую скорость заковки стали.

Скорость охлаждения. Чтобы установить скорость охлаждения при заковке, кроме

критической скорости закалики надо учитывать также форму и размеры закаливаемого изделия. Изделия, изготовленные из стали одного и того же состава и имеющие, следовательно, одинаковую критическую скорость закалики, будут охлаждаться с различной скоростью, если они отличаются друг от друга размерами и формой. Влияние размеров и формы изделия на скорость охлаждения при закатке весьма наглядно иллюстрируется следующим примером. Изготовим из одной и той же стали пластинку размерами 50 × 50 мм и толщиной 1 мм и шарик диаметром 10 мм. Если их охлаждать в одинаковой среде, то можно легко убедиться, что пластинка охлаждается значительно быстрее, чем шарик. Между тем пластинка весит около 20 г, а шарик всего около 5 г. Из этого примера видно, что скорость охлаждения сильно зависит от величины поверхности изделия. Чем меньше толщина изделия и чем больше отношение охлаждаемой поверхности к объему изделия, тем быстрее происходит охлаждение. Значения твердости образцов различных сечений, изготовленных из стали 45 и подвергнутых закатке в воде, приведены в табл. 7.

Таблица 7. Зависимость поверхностной твердости и структуры закаленной стали 45 от диаметра образца.

Диаметр образца (в мм.)	Поверхностная твердость (H_{RC})	Микроструктура
12,5	59	Мартенсит
25	58	Мартенсит
50	41	Троостит
75	35	Троостит
100	30	Сорбит
125	24	Сорбит

Данные приведенной таблицы показывают, что образцы, изготовленные из одной и той же стали и подвергнутые закатке в одинаковой среде, получили различные свойства и структуру. Это объясняется тем, что они имели различное сечение, и поэтому их охлаждение протекало с неодинаковой скоростью. Фактическая скорость охлаждения при закатке обычно характеризуется какой-то средней величиной. В действительности, охлаждение изделий при закатке в различных интервалах температур происходит с неодинаковой скоростью. В первый период охлаждения, когда разность температур нагретого изделия и охлаждающей среды очень велика (850 и 20°), изделие охлаждается значительно быстрее, чем в конце процесса, когда эта разность уже значительно меньше.

ОХЛАЖДАЮЩИЕ СРЕДЫ.

Различная скорость охлаждения изделия при закатке достигается путем применения той или иной охлаждающей (закалочной) жидкости: воды, масла, растворов солей в воде.

При охлаждении изделия в жидкости оно отдает часть своей теплоты на превращение в пар соприкасающейся с ним жидкости. Количество теплоты, которое расходуется на образование пара, называется скрытой теплотой парообразования.

Закаливающая способность охлаждающей среды зависит от многих факторов и, в первую очередь, от скрытой теплоты парообразования и температуры жидкости. У различных жидкостей скрытая теплота парообразования неодинакова. Чем выше теплота парообразования жидкости, тем больше ее закаливающая способность, так как изделие, отдавая большое количество тепла на образование пара, будет быстрее охлаждаться. Вода обладает большой скрытой теплотой парообразования и поэтому является сильной закаливающей средой. При охлаждении стали в закаливающей жидкости происходят некоторые явления, которые могут заметно снизить интенсивность охлаждения. Рассмотрим эти явления. При погружении раскаленного стального изделия в жидкость вокруг него образуется плотное кольцо пара, которое называют *паровой рубашкой*. Это кольцо пара изолирует изделие от охлаждающей жидкости и тем самым замедляет процесс его

охлаждения. Длительность существования паровой рубашки вокруг изделия у различных охлаждающих сред неодинакова. Паровая рубашка, образующаяся при закалке в масле, сохраняется более длительное время, чем паровая рубашка, получающаяся при закалке в воде. Это объясняется тем, что масло обладает гораздо большей вязкостью, чем вода.

Наличие в жидкости растворенных газов уменьшает ее закаливающую способность, так как газы, накапливающиеся на поверхности изделия, способствуют образованию газопаровой рубашки. По этой причине кипяченая или отработанная вода, содержащая мало газов, обладает лучшей закаливающей способностью, чем свежая вода. Как же уменьшить вредное влияние образующейся вокруг изделия паровой рубашки? Для этого надо ускорить разрушение ее или принять меры, предупреждающие ее образование.

Разрушение паровой рубашки можно ускорить путем передвижения изделия в закалочном баке вертикально по оси или горизонтально, в зависимости от формы изделия. Однако при закалке крупных изделий перемещение их в жидкости затруднено. В этом случае приводят в движение не изделие, а жидкость. Образование паровой рубашки можно предупредить путем использования некоторых охлаждающих сред, в частности растворов солей в воде.

В последнее время были проведены опыты, которые доказали возможность устранения паровой рубашки при помощи ультразвука. Для этого закаливаемые изделия погружаются в охлаждающую среду, в которой предварительно возбуждены ультразвуковые колебания. Так, например, в результате воздействия на охлаждающую среду (минеральное масло) ультразвуком в течение 10 мин. удалось повысить твердость закаливаемого в ней изделия на 19 единиц по Роквеллу. При этом структура стали измельчилась, уменьшилось количество окалины и пригоревшего масла. Промышленное внедрение закалки в средах, возбужденных ультразвуком, — вопрос ближайшего будущего. Чтобы правильно выбрать охлаждающие среды, необходимо знать их основные особенности.

Самой распространенной закалочной средой является вода. Ее охлаждающая способность находится в большой зависимости от температуры. Чем выше температура воды, тем меньше ее закалочная способность, поэтому при работе необходимо систематически следить за температурой воды. Обычно при закалке применяется вода температурой 20 – 30°.

Закаливающая способность воды при желании может быть уменьшена путем добавления в нее мела, извести, мыла, глицерина и тому подобных веществ или увеличена — при введении в нее хлористого натрия (поваренной соли) или едкого натрия (каустической соды). Вода, в которой растворен хлористый или едкий натрий, имеет более высокую скрытую теплоту парообразования. Кроме того, частицы соли, соприкасаясь с раскаленным металлом, взрываются и разрушают при этом паровую рубашку, увеличивая тем самым закаливающую способность воды. При использовании в качестве охлаждающей среды раствора поваренной соли в воде изделия сразу же после закалки надо промыть и просушить во избежание коррозии.

Преимущество раствора едкого натрия состоит в том, что щелочь, оставшаяся на изделии после закалки, не разъедает сталь. Однако брызги раствора едкого натрия разъедают кожу рук, поэтому их необходимо тщательно мыть. Широкое распространение в качестве охлаждающей среды имеет минеральное масло — трансформаторное и машинное.

Растительное масло охлаждает сталь быстрее минерального, но зато оно образует на изделии корку пригара. Кроме того, растительное масло в несколько раз дороже минерального. В настоящее время оно почти не применяется. Масло, используемое в качестве охлаждающей среды, должно быть чистым, иметь высокую температуру вспышки, не должно густеть, иначе расход его сильно возрастет. Масло, подогретое до температуры 50 – 60°, обладает более высокой закаливающей способностью, чем холодное. Это объясняется тем, что при нагреве масло становится менее вязким, поэтому паровая рубашка разрушается быстрее. Недостатком масла является его огнеопасность: температура вспышки трансформаторного масла равна 155°, машинного — 207°.

Охлаждающие жидкости располагаются в следующий ряд по их закалывающей способности:

- 1) 10%-ный раствор едкого натрия в воде;
- 2) 10%-ный раствор поваренной соли в воде;
- 3) водопроводная вода температурой 18°;
- 4) трансформаторное масло;
- 5) машинное масло;
- 6) водопроводная вода температурой 75°.

При массовом производстве, когда охлаждается большое количество изделий, важно иметь постоянную температуру охлаждающей среды. Это можно достигнуть путем применения искусственного охлаждения среды. Широко используется охлаждение закалочных баков при помощи змеевиков или труб, по которым непрерывно циркулирует холодная вода. В некоторых закалочных баках заставляют циркулировать по трубам охлаждающую жидкость. Находят применение также закалочные баки с двойными стенками, между которыми непрерывно циркулирует холодная вода. Масло можно охлаждать, пропуская через него воздух. Закалочный масляный бак с двумя стенками, в котором масло охлаждается с помощью воздуха и воды, показан на рис. 63. Необходимо иметь в виду, что все указанные способы искусственного охлаждения закалывающей среды дают надлежащий эффект только при достаточно большом объеме охлаждающей среды. Большое количество закалывающей жидкости необходимо для того, чтобы температура ее, даже при частом употреблении, значительно не повышалась и не ослабляла действия закалки. Можно получить слабую закалку даже в холодной воде, если ее будет немного. При выборе закалочной среды необходимо знать, как она охлаждает изделие в различных интервалах температур.

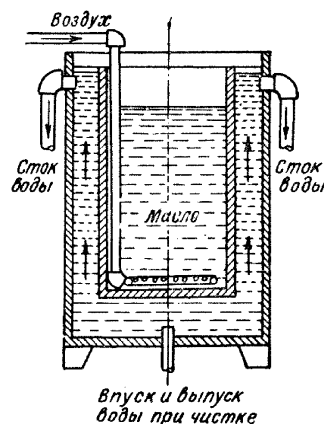


Рис. 63. Закалочный масляный бак.

Особенно важно знать, с какой скоростью изделие охлаждается в интервале температур 600 – 500° и 300 – 200°. Почему нас интересует скорость охлаждения изделия именно при указанных температурах? Дело в том, что при температурах 600 – 500° устойчивость аустенита очень мала, особенно у углеродистой стали (см. рис. 54). Поэтому мы заинтересованы в том, чтобы в этом интервале температур охлаждающая способность среды была большой — превышала критическую скорость закалки стали, иначе не будет получена структура мартенсита. Следовательно, наиболее важной характеристикой охлаждающей среды является ее закалывающая способность в интервале температур 600 – 500°. Другой важной характеристикой среды является ее охлаждающая способность в интервале температур 300 – 200°, так как при указанных температурах в углеродистой стали начинается превращение аустенита в мартенсит. Мы уже знаем, что для непосредственного перехода аустенита в мартенсит не требуется большой скорости охлаждения. Если нам удалось сохранить аустенит не-распавшимся до температуры 300 – 200°, то он перейдет в мартенсит и при медленном охлаждении. Более того, мы заинтересованы, чтобы скорость охлаждения изделия при температурах ниже 300° была замедленной.

Как указывалось, переход аустенита в мартенсит связан с изменением объема изделия. Аустенит имеет наименьший объем из всех структурных составляющих стали, а мартенсит — наибольший. Чем медленнее происходит охлаждение изделия в интервале температур 300 – 200°, тем равномернее будет протекать превращение аустенита в мартенсит, а это, в свою очередь, способствует уменьшению внутренних напряжений в изделии. Следовательно, замедленное охлаждение в интервале температур 300—200° уменьшает опасность коробления изделия и появления на нем трещин. Из изложенного выше ясно, что наилучшей является такая закалочная среда, которая в интервале температур 600 – 500° охлаждает изделие со скоростью выше критической скорости закалки, а при температурах 300 – 200° обеспечивает медленное, спокойное охлаждение изделия. Скорость охлаждения стали в

различных закалочных средах в интервале температур 600 – 500° и 300 – 200° приведена в табл. 8. Из данных приведенной таблицы видно, что вода и растворы солей в воде в интервале температур 600 – 500° обладают большой закаливающей способностью, и это является их достоинством. Недостатком этих охлаждающих сред является высокая скорость охлаждения в них изделия в интервале температур 300 – 200°. Кроме того, данные этой таблицы показывают, что охлаждающую способность воды в интервале температур 600—500° можно изменять в очень широких пределах (1200 – 30°) с помощью введения в нее различных добавок, однако при этом незначительно изменяется скорость охлаждения в интервале температур 300 – 200°.

Таблица 8. Скорость охлаждения стали в различных закалочных средах.

Закалочная среда	Скорость охлаждения (в °/сек.) в интервале температур	
	600 – 500°	300 – 200°
10% р-р едкого натрия в воде	1200	300
10% р-р поваренной соли в воде	1100	300
Пресная вода температурой 18°	600	270
Пресная вода температурой 50°	100	270
Пресная вода температурой 70°	30	200
Мыльная вода	30	200
Растительное масло	20	35
Трансформаторное масло	120	25
Машинное масло	100	20

Закалочная способность масла в интервале температур 600 – 500° в 4 – 5 раз меньше, чем холодной воды, зато при температурах 300 – 200° масло охлаждает изделие в 10 раз медленнее, чем вода, поэтому при закалке изделия в масле опасность его коробления и появления трещин значительно уменьшается. Как видно из табл. 8, углеродистые стали, у которых критическая скорость закалки составляет 400 – 600° в секунду, можно закалывать лишь в воде комнатной температуры и в водных растворах солей. Большинство легированных сталей можно закалывать в масле. Заслуживает внимания охлаждающая среда, применяемая на некоторых ленинградских заводах. Она представляет собой 10 – 12%-ный раствор марганцовокислого калия в воде. Указанная среда охлаждает изделие в интервалах температур 600 – 500° со скоростью 550° в секунду, а при температурах 300 – 200° – со скоростью 40° в секунду.

ЗАКАЛИВАЕМОСТЬ И ПРОКАЛИВАЕМОСТЬ СТАЛИ.

Важнейшими характеристиками стали, подвергаемой закалке, является ее закаливаемость и прокаливаемость. Эти характеристики не следует смешивать.

Закаливаемость — это характеристика, показывающая способность стали к повышению твердости при закалке. Некоторые стали обладают плохой закаливаемостью, т. е. имеют недостаточную твердость после закалки. О таких сталях на производстве говорят, что они «не принимают» закалку.

Чтобы определить закаливаемость той или иной стали, надо измерить твердость поверхности стального изделия после закалки. Чем выше эта твердость, тем лучше закаливаемость стали. Закаливаемость стали зависит в основном от содержания в ней углерода. Это объясняется тем, что твердость мартенсита зависит от степени искажения его кристаллической решетки. Чем меньше в мартенсите углерода, тем меньше будет искажена его кристаллическая решетка и, следовательно, тем ниже будет твердость стали. Это видно из следующих данных:

Содержание углерода в стали (%)	Твердость стали (H_{RC})
0,15	30
0,30	50
0,40	55
0,50	60
0,70	64

При дальнейшем повышении содержания углерода в мартенсите его твердость существенно не меняется. Стали, содержащие менее 0,25% углерода, имеют низкую закаливаемость и поэтому закалке обычно не подвергаются. Все углеродистые стали, содержащие более 0,3% углерода, обладают хорошей закаливаемостью. При закалке массивных изделий важно знать не только закаливаемость стали, но и ее прокаливаемость, т. е. глубину проникновения закалки. Очевидно, что при закалке изделия различные его слои охлаждаются неодинаково. Поверхностный слой, который непосредственно соприкасается с закалочной жидкостью, будет охлаждаться с большей скоростью, чем нижележащие слои. Наименьшая скорость охлаждения будет в центре изделия. Чем больше сечение изделия и чем оно толще, тем значительнее будет разница в скорости охлаждения поверхности и нижележащих слоев. На рис. 64 пунктирная кривая схематично показывает распределение скорости охлаждения при закалке в различных слоях изделия.

Из предыдущего известно, что структура мартенсита получается в том случае, если охлаждение стали производится со скоростью большей, чем критическая скорость закалки. В тех же слоях, где фактическая скорость охлаждения меньше критической, структура будет состоять из троостита, сорбита или перлита, в зависимости от толщины изделия. Если критическая скорость закалки ($v_{крит1}$) равна величине, показанной на рис. 64 горизонтальной пунктирной линией, то изделие насквозь не прокалится. Глубина закалки в этом случае будет равна заштрихованному слою, так как остальные слои изделия фактически охлаждаются со

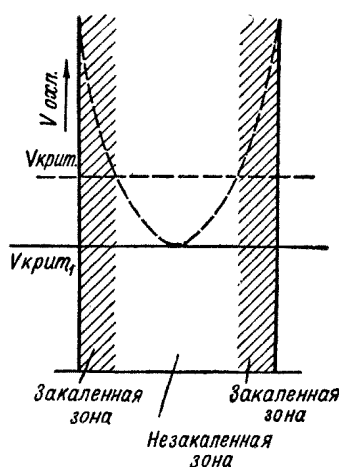


Рис. 64. Схема изменения скорости охлаждения по сечению изделия.

скоростью меньшей, чем критическая скорость закалки. Чтобы изделие получило сквозную закалку, надо изготовить его из стали, у которой критическая скорость закалки равна или меньше величины, указанной на рис. 64 сплошной линией ($v_{крит1}$). Следовательно, чем выше критическая скорость закалки стали, тем ниже ее прокаливаемость. Как известно, величина критической скорости закалки зависит от химического состава стали. Углеродистые стали имеют высокую критическую скорость закалки, поэтому у них низкая прокаливаемость. Из углеродистой стали не изготавливают массивных изделий, в которых необходимы высокие механические свойства по всему сечению. Такие изделия выполняют обычно из легированной стали, имеющей более высокую прокаливаемость.

Кроме химического состава, на прокаливаемость стали оказывает влияние также и величина зерна структуры: чем крупнее зерно стали, тем выше ее прокаливаемость. Прокаливаемость стали определяется путем исследования микроструктуры или измерения твердости специальных образцов, подвергнутых закалке. Глубиной закалки условно считают расстояние от поверхности изделия до того слоя, где структура состоит из 50% мартенсита и 50% троостита. Этот слой называют полумартенситной зоной. Твердость полумартенситной зоны зависит от содержания в стали углерода (табл. 9). Таким образом, для данной стали закаленным считается тот слой, твердость которого выше значения, приведенного в табл. 9.

Таблица 9. Твердость полумартенситной зоны в зависимости от содержания в стали углерода.

Содержание углерода (в %)	Твердость (H_{RC})
0,3	35
0,4	39
0,5	43
0,6	47
0,7	51
0,8	54

Прокаливаемость стали определяется также методом торцевой закалки. Преимущество этого метода состоит в том, что он проводится в стандартных условиях и поэтому дает сравнимые результаты. Схема прибора для торцевой закалки и эскиз образца приведены на рис. 65. Круглый образец 3 стандартных размеров нагревают на 50° выше критической температуры A_{c3} и выдерживают при этой температуре 30 мин. Затем его устанавливают в отверстие 4 кронштейна закалочного прибора. Струя воды поступает из трубки 1 и ударяет в торец образца. Высота струи регулируется краном по специальному указателю 2. Согласно ГОСТ, диаметр трубки 1 должен быть равен 12,5 мм, а высота свободной струи воды – 65 мм. Очевидно, что при торцевом охлаждении нижний торец образца охлаждается с максимальной скоростью, а по мере удаления от торца скорость охлаждения убывает.

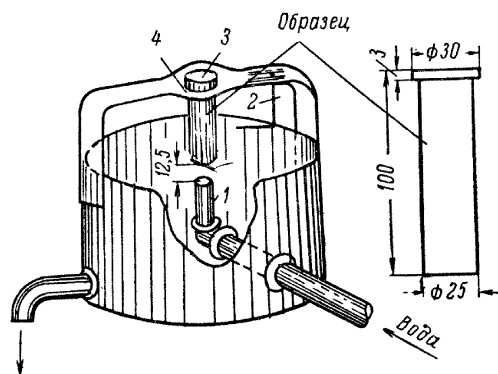


Рис. 65. Схема установки и эскиз образца для определения прокаливаемости стали методом торцевой закалки.

После охлаждения образец извлекают из прибора и измеряют его твердость на поверхности по длине через каждые 1,5 мм. Для этого с двух противоположных сторон образца (по длине) сошлифовывают плоскости. Результаты измерения твердости представляют в виде диаграмм. Затем с помощью данных табл. 9 определяют прокаливаемость стали. Кривые прокаливаемости двух различных сталей, полученные методом торцевой закалки, представлены на рис. 66. Как видно из этого рисунка, сталь 1 обладает более глубокой прокаливаемостью, чем сталь 2, закаливается же их одинаково. Таким образом, практическое значение прокаливаемости состоит в том, что она характеризует свойства, которые можно получить при закалке в сердцевине изделия, в то время как закаливается только поверхностный слой изделия.

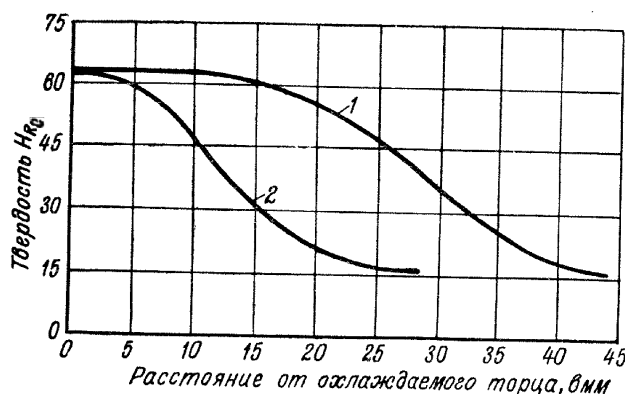


Рис. 66. Изменение твердости образцов (по длине) двух различных сталей после торцевой закалки.

ДЕФЕКТЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ В СТАЛИ ПРИ ЗАКАЛКЕ.

Закалка является наиболее ответственным видом термической обработки. Она протекает в тяжелых для изделия условиях вследствие весьма резкого изменения его температуры, поэтому при закалке необходимо тщательно и точно выполнять установленный режим. Ошибки и неточности, допущенные при закалке, очень часто вызывают дефекты, которые в ряде случаев приводят к неисправимому браку.

Коробление изделия и образование трещин — наиболее часто встречающиеся при закалке дефекты. Они являются результатом возникновения в изделиях больших внутренних напряжений, связанных с изменениями объема закаливаемого изделия. Объемные изменения и сопровождающие их внутренние напряжения имеют место в основном по двум причинам. Первой причиной является быстрое и резкое охлаждение изделий при закалке, в результате чего изменение объема различных слоев изделия протекает неодновременно. Это вызывает внутренние напряжения в изделии, механизм действия которых рассмотрен выше.

Чем больше поперечное сечение изделия, тем неравномернее происходит изменение объема в различных его слоях и, следовательно, тем выше будут внутренние напряжения.

Другой причиной появления закалочных трещин и коробления является изменение объема изделия при превращении аустенита в мартенсит. Как уже указывалось ранее, аустенит имеет наименьший объем из всех структурных составляющих стали, а мартенсит — наибольший. Следовательно, при переходе аустенита в мартенсит объем стали увеличивается. Так как при закалке превращение аустенита в мартенсит происходит неодновременно по всему сечению образца, то в нем возникают внутренние напряжения. В тех местах изделия, где эти внутренние напряжения окажутся выше предела прочности стали, появятся трещины. Если внутренние напряжения значительны, но не достигают предела прочности стали, то произойдет коробление изделия, т. е. искажение его формы. Возникновению опасных внутренних напряжений способствуют неблагоприятная форма изделия, резкие переходы по толщине, острые подрезы и т. п. Пример образования трещин при закалке на шлицевом валике вследствие острых углов канавок приведен на рис. 67. Закалочные трещины могут появляться также из-за неудовлетворительной подготовки структуры стали к закалке: недостаточного прогрева изделия перед охлаждением в закалочной среде или, наоборот, перегрева изделия и получения крупнозернистого строения.

Следует иметь в виду, что закалочные трещины могут появиться иногда значительное время спустя после закалки изделия. Поэтому отпуск рекомендуется производить сразу после закалки. Существует много способов, с помощью которых можно ослабить внутренние напряжения при закалке и свести к минимуму образование закалочных трещин и коробление изделий. Одним из таких мероприятий является предварительная подготовка структуры изделия к закалке путем отжига или нормализации. Это освобождает изделие от вредных внутренних напряжений, которые были созданы в нем всеми предыдущими видами обработки.

Если эти напряжения своевременно не снять, то они могут складываться с напряжениями, образующимися при закалке, и привести к короблению изделия или к трещинам.

Весьма эффективным способом уменьшения внутренних напряжений является медленное охлаждение изделия в интервале температур, при которых происходит превращение

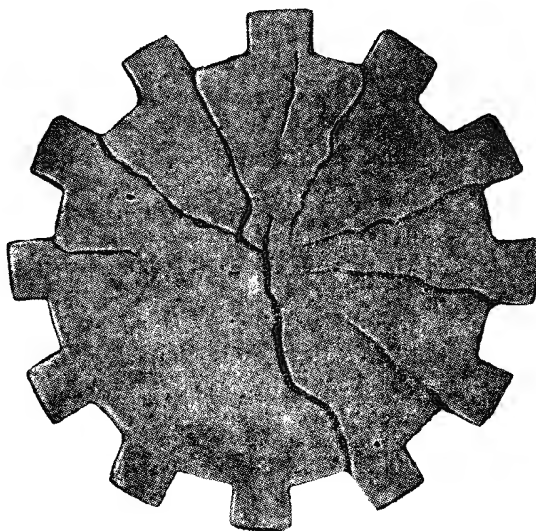


Рис. 67. Трещины на шлицевом валике, образовавшиеся после его закалки.

аустенита в мартенсит (для углеродистой стали 300° и ниже). Как известно, непосредственный переход аустенита в мартенсит не требует больших скоростей охлаждения. Если превращение аустенита в мартенсит будет происходить при медленном охлаждении изделия, то изменение его объема по сечению будет протекать более равномерно. Следовательно, будет достигнуто уменьшение внутренних напряжений. Существует несколько способов закалки, которые позволяют решить указанную задачу. Они рассматриваются на стр. 68. Важное значение при закалке имеет способ погружения изделия в охлаждающую среду. Неправильное погружение приводит к неравномерному распределению в металле внутренних напряжений, что может вызвать коробление изделия, а также недостаточную твердость его отдельных частей.

Как же следует погружать изделие в охлаждающую среду, чтобы указанные дефекты не имели места? На этот вопрос трудно дать исчерпывающий ответ. Искусство термиста в том и состоит, чтобы в каждом конкретном случае в зависимости от формы и размеров изделия выбрать рациональный способ погружения его в охлаждающую среду. Можно указать некоторые основные положения, которыми следует руководствоваться при решении этого вопроса. Изделия, имеющие длинную вытянутую форму (метчики, сверла, развертки), следует погружать в охлаждающую жидкость в строго вертикальном положении. Так же погружаются длинные фрезы с задней заточкой зубьев. Дисковые фрезы, круглые пилы и тому подобные изделия, наоборот, погружают в охлаждающую среду в горизонтальном положении. Способы погружения некоторых изделий в закалочную среду показаны на рис. 68. Если осевой инструмент погружать в жидкость в горизонтальном положении, то произойдет его коробление, как это видно из рис. 69.

Изделия, имеющие сквозные отверстия, следует погружать в охлаждающую среду закрытой стороной, чтобы воздух и пар могли выйти из отверстия, а вода проникла в него. Два возможных способа погружения в жидкость кузнечных обжимок показаны на рис. 70. При неправильном погружении обжимок на их рабочей поверхности будет скапливаться пар и поэтому ее твердость может быть занижена.

Детали имеющие вогнутую поверхность, нельзя погружать в охлаждающую среду вогнутой поверхностью вниз, так как образовавшаяся паровая рубашка не даст этому месту закалиться. При закалке изделий, имеющих неодинаковые сечения, сначала погружают в жидкость наиболее массивную их часть.

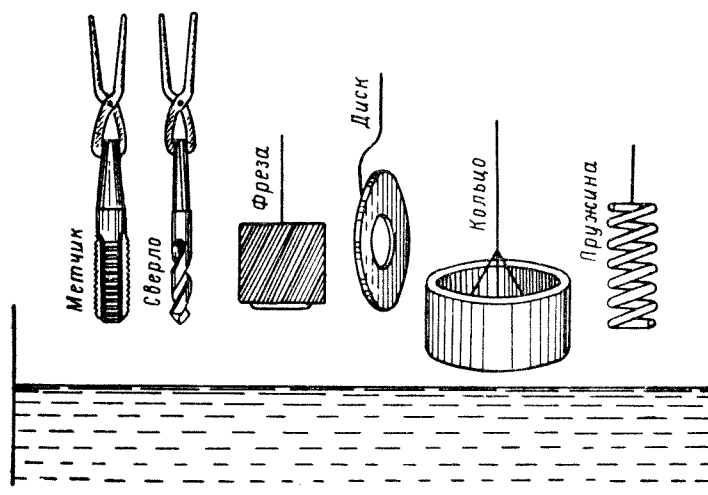


Рис. 68. Правильное погружение изделий и инструментов в охлаждающую среду.

Изделия плоской формы следует погружать в охлаждающую среду узкой стороной. Соблюдение указанных условий позволит значительно снизить образование закалочных трещин и коробление изделий при закалке. Кроме закалочных трещин и коробления изделий, при закалке могут иметь место и другие дефекты.

Недостаточная твердость стали объясняется недогревом или недостаточно сильным охлаждением изделия. Причину этого дефекта можно легко определить по микроструктуре стали. Так, например, если структура закаленной конструкционной стали содержит кроме мартенсита также и феррит, то недостаточная твердость является следствием недогрева. Если же в стали после закалки наряду с мартенситом имеется троостит, значит имело место недостаточно быстрое охлаждение. Этот дефект можно исправить повторной правильной закалкой стали. До повторной закалки нужно снять внутренние напряжения отжигом, нормализацией или высоким отпуском. Неравномерная твердость изделия (мягкие пятна) может быть вызвана теми же причинами, что и недостаточная твердость. Мягкие пятна могут быть и вследствие соприкосновения изделий друг с другом в процессе охлаждения, наличия жировых пятен на поверхности изделия или значительных скоплений феррита в отдельных его местах, а также из-за обезуглероживания поверхности изделия.

Если неравномерная твердость вызвана обезуглероживанием, то такой дефект неисправим. При других причинах этого дефекта его можно устранить теми же методами, что и недостаточную твердость. Повышенная хрупкость изделия чаще всего получается в результате его перегрева. Наличие перегрева можно установить как по излому, так и по микроструктуре стали (крупнозернистое строение). Этот дефект исправляется повторной термической обработкой изделия. При закалке стали, так же как при отжиге и нормализации, может иметь место окисление и обезуглероживание поверхности изделия. Причины этих дефектов и меры борьбы с ними рассмотрены на стр. 68.

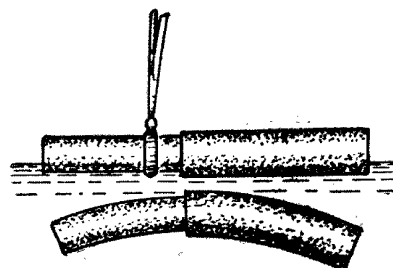


Рис. 69. Коробление осевого инструмента при закалке из-за неправильного погружения его в охлаждающую среду.

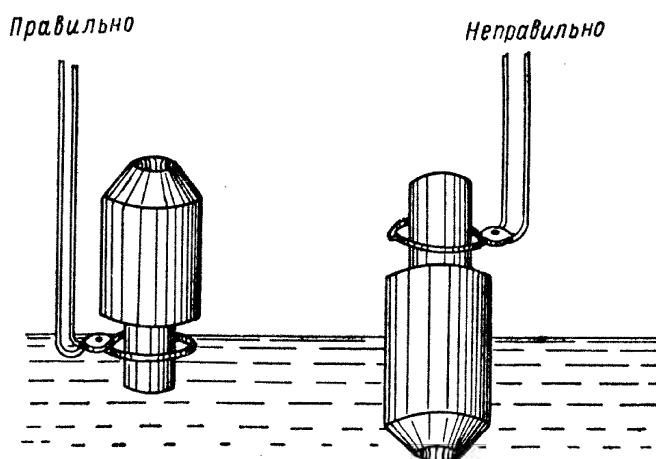


Рис. 70. Приемы закалки кузнечных обжимок.

СПОСОБЫ ЗАКАЛКИ СТАЛИ.

На практике применяется ряд способов закалки стали, которые отличаются друг от друга методом охлаждения закаливаемого изделия. Выбор того или иного способа закалки зависит от формы и размеров изделия, химического состава стали, а также от тех требований, которые предъявляются к изделию.

Закалка в одной охлаждающей среде (непрерывная закалка) является наиболее простым способом обработки. Он состоит в том, что изделие, нагретое до определенной температуры, охлаждается в воде или в масле до выравнивания температуры изделия с температурой

ванны. Этот способ широко применяется для несложных по форме изделий и инструментов, требующих возможно более глубокой закалки. При закалке указанным способом изделий сложной формы может иметь место коробление изделий или образование закалочных трещин.

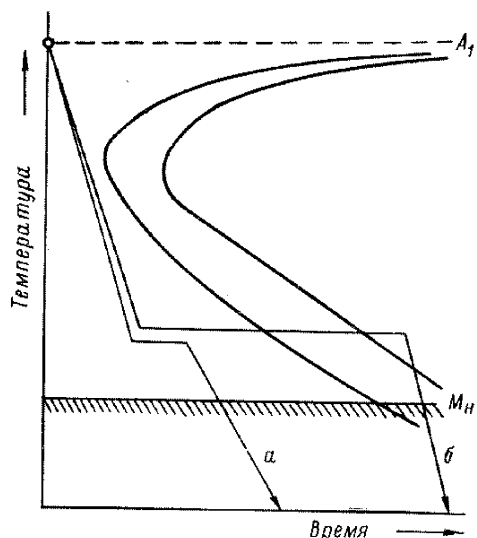


Рис. 71. Кривые охлаждения, нанесенные на диаграмму изотермического превращения аустенита:
а – ступенчатая закалка;
б – изотермическая закалка.

Закалка в двух охлаждающих средах (прерывистая закалка) – это такой способ обработки, когда изделие охлаждается сначала в воде (до температуры $400 - 300^\circ$), а затем в масле для более замедленного охлаждения. Таким путем достигают уменьшения внутренних напряжений в стали в момент перехода аустенита в мартенсит. Самое трудное при этом способе закалки – это точно выдержать время пребывания изделия в воде. Если изделие перенести в масло с опозданием, то никакого преимущества эта закалка не даст. И, наоборот, если изделие перенести в масло слишком рано, то не будет получена необходимая твердость стали, так как в структуре может оказаться троостит. На практике момент переноса изделия из воды в масло определяют по внешним признакам (например, по прекращению дрожания шипцов, которыми держат изделие, или по

прекращению слабо звящего шума, который вызван сильным кипением воды вокруг изделия).

При ступенчатой закалке изделие охлаждается также в двух средах. Здесь преследуются те же цели, что и при прерывистой закалке. Этот способ закалки осуществляется следующим образом. Изделие, нагретое до температуры закалки, переносится для быстрого охлаждения в соляную ванну, состоящую из смеси азотных и азотнокислых солей или 75% едкого калия и 25% едкого натрия с добавкой 5 – 8% от веса всех солей воды. Благодаря наличию воды такая смесь обладает хорошей закалывающей способностью. Соляная ванна должна иметь достаточный объем и постоянную температуру, автоматически регулируемую в узких пределах. Температура ванны должна быть немного выше температуры, при которой начинается превращение аустенита в мартенсит. Для углеродистой стали эта температура равна $300 - 250^\circ$. В указанной ванне изделие выдерживается в течение времени, достаточного для выравнивания температуры изделия по всему сечению. Выдержка должна быть настолько короткой, чтобы не началось превращение аустенита в троостит. Кривая охлаждения при ступенчатой закалке приведена на рис. 71. После окончания выдержки изделие охлаждают на воздухе. В это время в стали происходит превращение аустенита в мартенсит. При такой закалке значительно уменьшаются внутренние напряжения в стали, так как превращение аустенита в мартенсит начинается одновременно по всему сечению изделия и протекает при медленном охлаждении его на воздухе. Ступенчатая закалка широко применяется при массовом производстве инструментов и других изделий малых сечений.

Изотермическая закалка основана на превращениях переохлажденного аустенита при постоянной температуре. Кривая охлаждения изделия при изотермической закалке приведена на рис. 71. При изотермической закалке изделие охлаждается также в горячей соляной ванне, как и при ступенчатой закалке. Однако изделие выдерживается в ванне более длительное время — до тех пор, пока не закончится распад аустенита (см. рис. 71). Окончательное охлаждение изделия производится на воздухе. В это время структура стали

уже не изменяется. В результате изотермической закалки изделие получает структуру игольчатого троостита, который обладает несколько меньшей твердостью, чем мартенсит, но повышенной вязкостью. Этот способ закалки обеспечивает получение в изделиях однородной структуры с минимальными внутренними напряжениями. Изотермической закалке подвергают мелкие изделия из углеродистой стали. Для более массивных изделий из углеродистой стали этот способ закалки (как и ступенчатый) неприменим, так как при охлаждении таких изделий в горячей среде не удастся сохранить аустенит не распавшимся до температуры 300 – 250°. Крупные изделия из легированной стали могут подвергаться этому виду закалки.

При закалке с подстуживанием нагретое изделие перед погружением в охлаждающую среду некоторое время выдерживают на воздухе или в другой печи с более низкой температурой. Эта операция называется *подстуживанием*. При такой закалке уменьшаются внутренние напряжения стали, так как уменьшается разность температур закаливаемого изделия и охлаждающей среды. Этот способ закалки основан на том положении, что критические температуры при охлаждении ниже критических температур при нагревании. Время выдержки при подстуживании должно быть небольшим, чтобы не началось превращение аустенита в перлит. Закалке с подстуживанием подвергаются длинные и тонкие изделия во избежание их коробления.

Закалка с самоотпуском широко распространена в инструментальном производстве. Особенность этого способа состоит в том, что отпуск изделия происходит за счет теплоты, оставшейся во внутренних слоях после закалки. Практически закалку с самоотпуском осуществляют следующим образом. Инструмент нагревают до температуры закалки, выдерживают необходимое время при этой температуре и затем погружают в воду только рабочую часть инструмента. Извлеченный из воды инструмент выдерживают на воздухе до тех пор, пока его рабочая часть не нагреется до температуры отпуска. Нагрев происходит за счет тепла той части инструмента, которая не погружалась в воду. После этого инструмент окончательно охлаждают в воде или масле. Температуру отпуска определяют по цветам побежалости, для чего часть рабочей поверхности инструмента зачищают. Появление цветов побежалости при отпуске объясняется тем, что при температурах 200 – 300° на чистой полированной и шлифованной поверхности возникают тонкие слои окислов. Цвет поверхности изделия зависит от толщины слоя окислов. Данные об изменении цвета побежалости углеродистых и малолегированных сталей в зависимости от температуры приведены в табл. 10. Измерение температуры при самоотпуске может производиться также при помощи так называемых термокарандашей, которые при определенных температурах изменяют свой цвет.

Таблица 10. Цвета побежалости углеродистых и малолегированных сталей при различных температурах.

Цвета побежалости	Температура (в °)
Соломенно – желтый	220 – 240
Оранжевый	240 – 260
Красно – фиолетовый	260 – 280
Синий	280 – 300

Глава VIII. ПОВЕРХНОСТНАЯ ЗАКАЛКА СТАЛИ.

Поверхностной называется такая закалка, при которой высокую твердость приобретает лишь некоторый поверхностный слой стали. Поверхностной закалке подвергают изделия, работающие на кручение и истирание: шейки коленчатых валов, зубья шестерен и т. п. Такие изделия должны иметь высокую твердость только в поверхностном слое, сердцевина же их должна быть вязкой. Поверхностная закалка отличается от всех ранее рассмотренных

способов заковки не методом охлаждения, а методом нагрева. При этом способе обработки нагревают до температуры заковки только поверхностные слои изделия. При дальнейшем быстром охлаждении изделия только этот слой и подвергается заковке. Остальная часть изделия не закаливается и сохраняет структуру и свойства, которые оно имело до заковки.

ПОВЕРХНОСТНАЯ ЗАКОВКА ПРИ НАГРЕВЕ ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ.

Наиболее прогрессивным методом нагрева изделий для поверхностной заковки является *нагрев токами высокой (или повышенной) частоты*, или, как его еще часто называют, *индукционный нагрев*. Этот способ был разработан В. П. Вологдиным и в настоящее время широко применяется. Необходимо отметить, что общепринятые термины «высокочастотная заковка», «поверхностная заковка токами высокой частоты» не совсем правильно отражают сущность протекающих явлений. Следует иметь в виду, что непосредственно в процессе заковки токи высокой частоты не используются, - они применяются лишь для нагрева поверхности изделия до закалочных температур.

Токи высокой частоты — это переменные токи, имеющие частоту более 20000 периодов в секунду. Токами повышенной частоты называют переменные токи с частотой от 50 до 20000 периодов в секунду. Обычный промышленный ток имеет частоту 50 периодов в секунду, т. е. он меняет свое направление 100 раз в одну секунду.

Применение токов высокой частоты для нагрева при поверхностной заковке основано на явлении, которое называется *поверхностным эффектом*. Это явление состоит в следующем. При прохождении через проводник постоянный ток равномерно распределяется по всему сечению проводника, как это схематично показано на рис. 72, т. е. плотность тока по всему сечению проводника одинакова. В отличие от этого, переменный ток, проходя через проводник сравнительно большого диаметра, распределяется неодинаково по его сечению. Ток протекает преимущественно в поверхностном слое проводника. При достаточно высоких частотах в центре проводника ток практически нет. Это явление называется *поверхностным эффектом*. Схема распределения постоянного и переменного токов различной частоты в проводнике приведена на рис. 72. Степень проявления поверхностного эффекта характеризуется глубиной проникновения тока, что определяет и глубину слоя проводника, в котором выделяется тепло, а следовательно и глубину заковки. Наибольшая экономичность процесса достигается тогда, когда глубина проникновения тока немного больше требуемой глубины заковки.

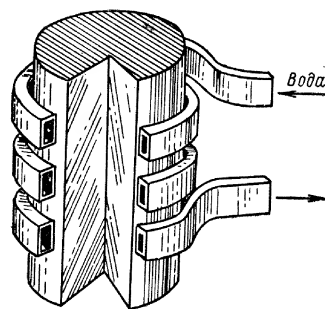


Рис. 73. Многовитковый индуктор.

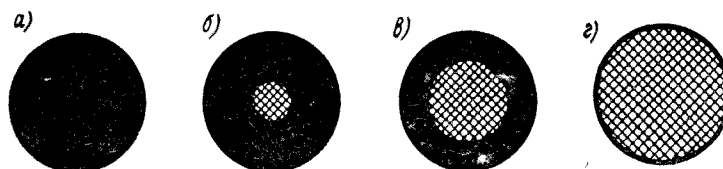


Рис. 72. Схема распределения постоянного и переменного тока различной частоты в проводнике: а — постоянный ток; б — 50 периодов в секунду; в — 2500 периодов в секунду; г — 25000 периодов в секунду (в заштрихованной части тока нет).

Как видно из рис. 72, на глубину проникновения тока большое влияние оказывает его частота. Чем больше частота тока, тем меньше глубина проникновения его в проводник и, следовательно, тем меньше глубина заковки. Распределение тока по сечению проводника зависит также от природы и свойств проводника. Процесс нагрева токами высокой частоты

осуществляется практически следующим образом. Изделие, подлежащее нагреву, помещают внутри спирали, изготовленной из медной трубки (рис. 73). Эта спираль называется *индуктором*. Через индуктор пропускают ток высокой частоты большой силы (в несколько сот или тысяч ампер). Этот ток создает вокруг изделия мощное переменное магнитное поле. Так как это поле переменное, то изделие будет перемагничиваться много раз в секунду. В результате в нагреваемом изделии возникнут короткозамкнутые токи, которые называют вихревыми токами. Вследствие поверхностного эффекта, который был описан выше, они сосредоточиваются в поверхностном слое изделия и нагревают его на определенную глубину. Продолжительность нагрева изделия токами высокой частоты весьма мала, — она исчисляется секундами. Таким образом, нагрев изделия осуществляется электрическими токами, находящимися в самом изделии. Индуктор служит лишь для того, чтобы возбудить эти токи внутри изделия. После нагрева изделия до необходимой температуры и глубины ток выключается, и нагретое изделие интенсивно охлаждается струей жидкости (обычно воды). Охлаждающая струя подается большей частью через отверстия 1, расположенные на внутренней стенке индуктора (рис. 74). По окончании охлаждения подача воды автоматически прекращается. Существуют и другие способы охлаждения нагретого изделия. Сам индуктор в процессе работы не нагревается, так как он интенсивно охлаждается циркулирующей внутри его водой.

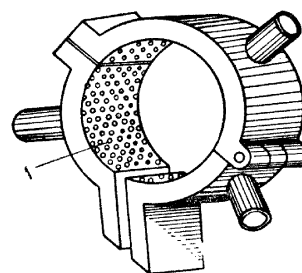


Рис.74. Индуктор с отверстиями для подачи воды.

Для преобразования переменного промышленного тока в ток высокой или повышенной частоты применяются высокочастотные установки в основном двух типов: с машинным или с ламповым генератором. Основные элементы высокочастотной установки с машинным генератором схематично показаны на рис. 75. Изделие 1 помещается в индуктор 2, к которому поступает ток от машинного генератора 3. Вращение генератора производится электродвигателем 4. Трансформатор 5 понижает напряжение, а конденсаторы 6 увеличивают силу тока в индукторе и улучшают работу генератора. Установки с машинными генераторами обычно создают ток частотой от 500 до 12000 периодов в секунду. Они используются для поверхностной закалки крупных изделий на глубину более 2 мм. Установки с ламповыми генераторами позволяют получать токи частотой свыше 100000 периодов в секунду. Они применяются для поверхностной закалки мелких изделий на глубину 1 – 2 мм. Имеется несколько способов нагрева изделий токами высокой частоты. При закалке мелких изделий применяется метод *одновременного нагрева изделия*. В этом случае вся поверхность изделия, подлежащая закалке, находится в зоне действия индуктора и нагревается одновременно. По окончании нагрева вся закаливаемая поверхность одновременно охлаждается. Этот способ обеспечивает высокую производительность закалки, но его применение ограничивается мощностью генератора. Если поверхность изделия, подлежащая высокочастотному нагреву, очень велика (1000 см^2 и более), то целесообразно производить нагрев *непрерывно-последовательным методом*, схема которого приведена на рис. 76. Изделие 1 перемещается в индукторе 2, или, наоборот, индуктор движется вдоль изделия с небольшой скоростью (3 – 30 мм/сек). Вся поверхность изделия постепенно проходит через зону действия индуктора, нагревается и, попадая под охлаждающую струю воды 3, закаливается. Температура нагрева и глубина закаливаемого слоя устанавливаются опытным путем и регулируются скоростью движения изделия или индуктора, а также мощностью установки. Очевидно, что чем меньше время нахождения изделия в магнитном поле индуктора, тем меньше оно прогревается. Например, при закалке током частотой более 100 000 гц на глубину 1 мм изделие перемещают со скоростью около 10 мм/сек, а на глубину в 2 мм – со скоростью около 5 мм/сек.

Выбор индуктора. Основной рабочей частью высокочастотной установки является индуктор. Для каждого типа изделий изготавливается специальный индуктор, форма которого должна соответствовать форме закаливаемого изделия. Поэтому индукторы могут иметь самую разнообразную форму. Индукторы могут состоять из одного витка, охватывающего нагреваемое изделие (см. рис. 74); такой индуктор называют одновитковым. Бывают также много витковые индукторы (см. рис. 73). Правильный выбор формы и размеров индуктора определяет в основном экономичность и качество высокочастотного нагрева. Новатор термист – высокочастотник П. Н. Вялых предложил индуктор особой формы (рис. 77), позволяющий производить поверхностную закалку шестерен с двойным зубом за один нагрев. Как видно из этого рисунка, индуктор имеет три витка. Для нагрева боковых зубьев используются два витка, а для нагрева торцевого зуба – один виток. Индуктор изготовлен из трубки диаметром 8 мм. Продолжительность нагрева шестерни описанным индуктором составляет 5 – 6 сек. Раньше при закалке такой шестерни производили два нагрева двумя индукторами: вначале нагревали боковые зубья, а затем меняли индуктор и нагревали зубья, расположенные с торца. Применение индуктора рациональной конструкции не только повысило производительность труда, но и привело к более качественной термической обработке изделия. Двойной двухвитковый индуктор конструкции П. Н. Вялых приведен на рис. 78. Индуктор представляет собой два соединенных трубкой двухвитковых индуктора общей высотой 175 мм. Чтобы продольная трубка не участвовала в нагреве, она отводится в сторону примерно на 25–26 мм. Индуктор позволяет нагревать одновременно два пояса вала (рис. 79). Ранее эта операция производилась за два нагрева.

При высокочастотном нагреве важное значение имеет также правильный выбор зазора между индуктором и помещенным внутри его изделием. От этого зависит к. п. д. нагрева, а следовательно скорость и температура нагрева. Чем меньше зазор, тем быстрее нагревается

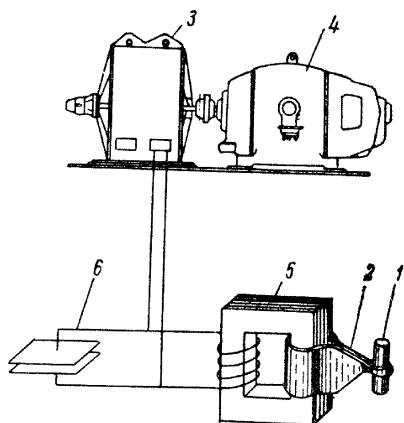


Рис. 75. Высокочастотная установка с машинным генератором.

также формы изделия требует уточнения режимов высокочастотного нагрева.

изделие до заданной температуры. Практически величина зазора между индуктором и нагреваемым изделием составляет от 2 до 5 мм. Для обеспечения равномерности нагрева необходимо, чтобы изделие и индуктор были расположены симметрично, т. е. расстояние от индуктора до изделия было во всех точках одинаковым. Это достигается при вращении закаливаемого изделия. Для нагрева внутренних поверхностей

цилиндрического изделия индуктор вводится в изделие. Необходимо иметь в виду, что изменение марки стали, а

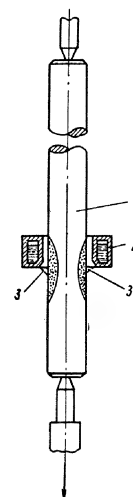


Рис. 76. Непрерывно последовательная закалка стали при высокочастотном нагреве.

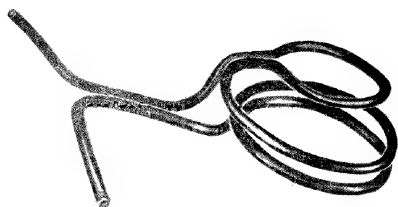


Рис. 77. Индуктор для закали шестерен с двойным зубом.

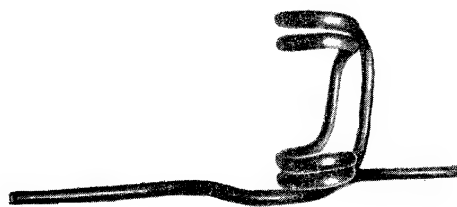


Рис. 78. Двойной двухвитковый индуктор.

Особенности процесса. Поверхностной закалке подвергают стали, содержащие 0,35 – 0,55% углерода (наиболее часто сталь марки 45). Режим высокочастотного нагрева стали в большой степени зависит от состояния исходной структуры обрабатываемой стали. Наиболее быстро и при более низких температурах протекают превращения в мелкозернистой стали, особенно со структурой сорбита. Однако получение такой структуры связано со сложной термической обработкой стали (сквозная закалка и высокий. Наибольшее распространение в качестве предварительной термической обработки стали перед высокочастотным нагревом получил процесс нормализации. На Московском автомобильном заводе им. Лихачева сконструирована высокочастотная автоматическая установка, позволяющая производить нормализацию изделия по всему сечению и последующую поверхностную закалку его. При высокочастотном нагреве структурные превращения в стали протекают при более высоких температурах, чем при медленном нагреве в печах. Исследования показывают, что критическая температура A_{c1} при высокочастотном нагреве смещается вверх на $30 - 40^\circ$, а A_{c3} – на $50 - 150^\circ$. Таким образом, процесс закалки при высокочастотном нагреве осуществляется при более высоких температурах, чем при нагреве в печах. Смещение критических температур объясняется тем, что при высокочастотной закалке скорость нагрева

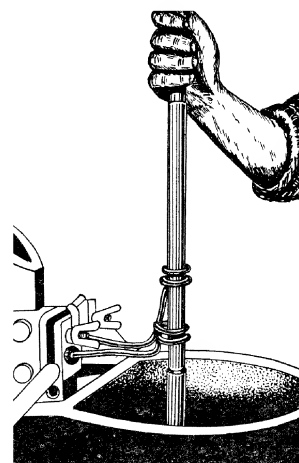


Рис. 79. Одновременный нагрев вала в двух местах.

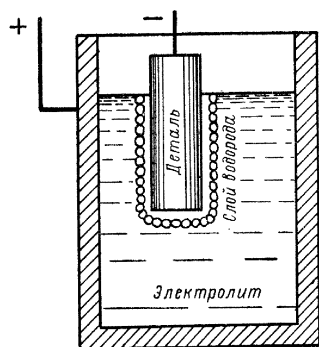


Рис. 80. Схема нагрева детали в электролите.

очень велика – десятки и сотни градусов в секунду (при нагреве в печах она составляет $1,5 - 3^\circ$ в минуту), и поэтому диффузионные процессы, которые имеют место при превращениях в структуре стали, не успевают произойти при критических температурах, указанных на диаграмме состояния железоуглеродистых сплавов (см. рис. 46). Чем крупнее исходная структура стали и чем больше скорость нагрева, тем значительно повышаются критические температуры. Несмотря на высокую температуру нагрева при закалке стали токами высокой частоты, роста зерна структуры не наблюдается. Это объясняется тем, что при большой скорости нагрева и отсутствии выдержки зерно аустенита вырасти не успевает. При правильном режиме высокочастотной

закалки в стали получается структура мелкоигольчатого мартенсита обладающего более высокой твердостью и прочностью чем при обычной закалке стали. На автомобильном заводе им. Лихачева применяется прогрессивный процесс поверхностной закалки с самоотпуском вместо отпуска в печах. Сущность его состоит в том, что охлаждение изделия не доводят до конца, а прерывают с тем, чтобы за счет оставшегося внутри изделия тепла нагреть его до температуры отпуска ($200 - 250^\circ$). Закалка с самоотпуском при

высокочастотном нагреве легко выполняема, потому что подача на изделие охлаждающей струи производится автоматически, следовательно, время действия струи можно легко регулировать. Преимущества высокочастотного нагрева при поверхностной закалке заключаются в следующем:

- 1) высокая производительность процесса: операция поверхностной закалки осуществляется за 10 – 20 сек.;
- 2) получение у изделия более высоких механических свойств, чем при обычной закалке;
- 3) отсутствие обезуглероживания и заметного окисления поверхности изделия;
- 4) снижение стоимости изделия; по данным автомобильного завода им. Лихачева, высокочастотная закалка обходится в 2 – 6 раз дешевле, чем другие процессы поверхностного упрочнения;
- 5) возможность комплексной автоматизации и механизации технологических процессов (создание автоматических линий); на ряде заводов высокочастотные установки встроены в поточные линии механических цехов. Вместе с тем необходимо отметить, что высокочастотный нагрев дает экономический эффект лишь при крупносерийном и массовом производстве, что объясняется дороговизной установки.

ПОВЕРХНОСТНАЯ ЗАКАЛКА ПРИ НАГРЕВЕ В ЭЛЕКТРОЛИТЕ.

Этот новый, прогрессивный метод разработан инж. И. З. Ясногородским. Сущность его заключается в следующем. Изделие (или часть изделия), подлежащее закалке, погружают на некоторую глубину в раствор кальцинированной соды, через который пропускают постоянный ток напряжением 220—380 В (рис. 80). Под действием электрического тока вокруг погруженного в раствор изделия образуется тонкий слой из пузырьков водорода с высоким электросопротивлением, так как водород плохой проводник электричества. Слой водорода быстро нагревается до высокой температуры и в течение нескольких секунд разогревает погруженную в электролит поверхность изделия выше температуры A_{c1} . По окончании нагрева ток выключают, а изделие оставляют для охлаждения в том же электролите, так как в процессе прохождения тока он остается холодным. Можно перенести изделие для охлаждения и в закалочный бак. Метод поверхностной закалки в электролите отличается высокой производительностью. При этом способе закалки изделия почти не окисляются и не коробятся. Практическое применение этого способа встречает пока еще некоторые трудности, связанные с регулировкой температуры нагрева и формой закаливаемых изделий.

Глава IX.

ОТПУСК СТАЛИ. СУЩНОСТЬ И НАЗНАЧЕНИЕ ОТПУСКА.

Закаленная сталь находится в напряженном состоянии и поэтому она обладает значительной хрупкостью. Для улучшения свойств стали и увеличения долговечности ее службы необходимо снять внутренние напряжения или хотя бы уменьшить их. Для этого инструменты и изделия из стали после закалки почти всегда подвергаются повторному нагреву до температур, лежащих ниже критической температуры A_{c1} , (723°), и после некоторой выдержки при температуре нагрева медленно или быстро охлаждаются. Этот вид термической обработки стали называется *отпуском*. Даже в тех случаях, когда изделие должно иметь максимальную твердость, оно подвергается после закалки отпуску для снятия внутренних напряжений. С помощью отпуска можно достигнуть также распада мартенсита и повышения благодаря этому пластичности и вязкости стали при сохранении достаточно высокой прочности.

Наиболее важной операцией при отпуске является нагрев. Результаты отпуска определяются температурой нагрева изделия и достаточной выдержкой его при этой температуре. Поэтому особенное внимание должно быть уделено правильному выбору температуры нагрева и ее

поддержанию во время отпуска. В зависимости от требований, предъявляемых к изделию, температура отпуска колеблется в пределах от 150 до 680°. Нагревать изделия до температуры отпуска следует постепенно и равномерно. Изделия обычно загружают в холодные печи (или нагретые до температуры 200°) и затем медленно нагревают до температуры отпуска со скоростью 50 – 100° в час (в зависимости от сечения изделия). Быстрый нагрев может привести к образованию на изделии трещин. Отпуск производится в камерных и пламенных печах, а также в электрических типа ПН-32. Для обеспечения более равномерного нагрева в печах устанавливают вентиляторы с замкнутой циркуляцией воздуха. Они необходимы потому, что при относительно низких температурах (до 500 – 600°) теплопередача от спокойного воздуха к металлу происходит весьма медленно и неравномерно. Мелкие изделия (например, инструменты) отпускают в масляных и соляных ваннах, а также на горячих плитах или в песчаных банях. В этих условиях нагрева исключаются случайные колебания температуры, что имеет большое значение при отпуске. Скорость охлаждения при отпуске углеродистой стали не имеет существенного значения, так как при охлаждении отпущенной стали структурные превращения в ней не протекают. Охлаждение при отпуске чаще всего производят на спокойном воздухе. Некоторые легированные стали охлаждают даже в воде, но это вызывается особыми обстоятельствами, которые будут рассмотрены в дальнейшем.

ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ ПРИ ОТПУСКЕ.

Структура стали после закалки обычно состоит из мартенсита и небольшого количества остаточного аустенита, причем кристаллическая решетка мартенсита искажена. Как мартенсит, так и аустенит являются неустойчивыми структурами. Длительное пребывание закаленной стали даже при комнатной температуре вызывает в ней структурные превращения. Например, если выдерживать закаленную сталь при температуре 20° в течение 40 месяцев, то содержание углерода в мартенсите уменьшится с 1,35 до 1,02%. Нагрев значительно ускоряет структурные превращения в закаленной стали. При отпуске закаленной стали в ее структуре происходят следующие превращения:

- 1) кристаллическая решетка мартенсита принимает правильную форму куба;
- 2) остаточный аустенит превращается в мартенсит;
- 3) мартенсит распадается на механическую смесь феррита и цементита;
- 4) образовавшиеся частицы цементита коагулируют (разрастаются и приобретают округлую форму).

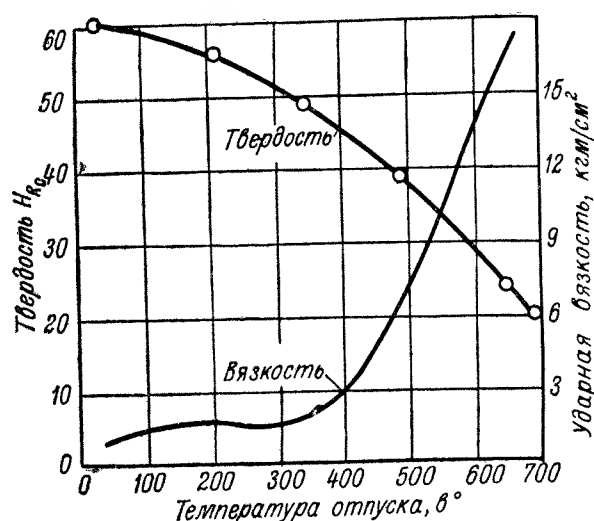


Рис. 81. Изменение твердости и вязкости стали 45 в зависимости от температур отпуска.

Эти превращения накладываются друг на друга, поэтому трудно определить температурные границы для каждого процесса. Можно лишь указать, при каких температурах то или иное превращение является основным, ведущим. Первое превращение происходит при температурах 100 – 200°. При этих температурах устраняется искажение кристаллической решетки мартенсита. Она принимает форму куба, благодаря чему в стали несколько ослабляются внутренние напряжения. Мартенсит, имеющий кубическую решетку, называется отпущенным мартенситом.

Второе превращение протекает при температурах 200 – 270° и состоит в переходе остаточного аустенита в отпущенный мартенсит, который является менее напряженной структурой, чем мартенсит закалки.

Третье превращение протекает при температурах 300 – 400°. При этих температурах происходит распад мартенсита: из кристаллической решетки мартенсита выделяется избыточный углерод в виде цементита. В результате получается весьма измельченная смесь феррита и цементита – троостит отпуска.

Четвертое превращение протекает заметно при температурах, превышающих 400°. В результате отпуска стали при температурах 500 – 650° образуется механическая смесь более крупных частиц феррита и цементита – сорбит отпуска. При протекании третьего и четвертого превращений твердость стали заметно понижается, а пластичность и вязкость повышаются. Полученные в результате распада мартенсита троостит и сорбит отпуска имеют зернистую форму цементита, в то время как аналогичные структуры, полученные в результате охлаждения аустенита, имеют пластинчатую форму цементита. При равной прочности зернистые структуры (структуры отпуска) обладают большей пластичностью и вязкостью. Кривые изменения твердости и вязкости стали 45 в зависимости от температур отпуска приведены на рис. 81. Таким образом, при отпуске протекают те превращения, которые не успели произойти в стали при закалке ввиду ее быстрого охлаждения.

ВИДЫ ОТПУСКА.

На практике применяются три вида отпуска.

Низкий отпуск производится при температурах 150 – 300°. Цель его – уменьшить внутренние напряжения в закаленном изделии, не снижая или очень мало снижая при этом его твердость. В результате низкого отпуска получают структуру отпущенного мартенсита. Низкому отпуску обычно подвергают инструменты. Температуры отпуска и получаемые значения твердости некоторых инструментов из углеродистой стали приведены в табл. 11.

Таблица 11. Температура отпуска некоторых инструментов из углеродистой стали.

Виды инструмента	Марка стали	Температура (в °C)	Твердость по Роквеллу
Фрезы, сверла, метчики, калибры и т. п.	У10 – У12	160 – 200	60 – 64
Матрицы и пуансоны для холодной листовой штамповки и холодной высадки.	У10	210 – 260	55 – 60
Зубила, молотки, кувалды.	У7	280 – 300	53 – 56

Средний отпуск осуществляется при температурах 300 – 450°. Применяется он для изделий, от которых требуются достаточно высокая твердость ($H_R = 40 - 50$) и высокий предел упругости при наличии определенной вязкости. Наиболее часто такому отпуску подвергаются пружины и рессоры. После среднего отпуска структура стали состоит из троостита.

Высокий отпуск производится при температурах 500 – 680°. После такого отпуска сталь имеет структуру сорбита. Сталь, подвергнутая закалке и последующему высокому отпуску, называется улучшенной. Такая сталь обладает высокой прочностью и вязкостью. Поэтому высокому отпуску подвергают почти все детали машин ответственного назначения.

Глава X. ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ.

В настоящей главе рассматривается тепловая обработка стали, в процессе которой происходит изменение не только структуры металла, но и химического состава его поверхностного слоя. Такая обработка носит название химико-термической. При помощи химико-термической обработки в различных слоях металла можно получить неодинаковый химический состав, а следовательно и различные свойства. Существует большое количество изделий, у которых свойства поверхностного слоя металла должны быть иными, чем свойства внутренних слоев. Например, зубья шестерни в процессе работы испытывают сильное трение, поэтому они должны обладать большой твердостью. Однако внутри шестерня должна иметь небольшую твердость и хорошую вязкость, чтобы она не разрушалась от толчков и ударов. Следовательно, шестерня должна быть твердой с поверхности и вязкой в сердцевине.

Можно привести и другой пример. Если изделие работает в морской воде или в среде кислот и щелочей, то необходимо, чтобы его поверхность хорошо сопротивлялась коррозии. Для повышения устойчивости изделия против коррозии требуется определенный химический состав его поверхностного слоя. Вместе с тем внутренние слои металла не входят в соприкосновение с указанными средами и поэтому могут иметь обычный химический состав. Следовательно, и в этом случае химический состав поверхностного и внутреннего слоев металла может быть неодинаков. Таким образом, основной особенностью химико-термической обработки является изменение химического состава поверхностного слоя металла. В этом и заключается принципиальное отличие ее от обычных видов термической обработки, при которых изменение свойств металла достигается лишь за счет его структурных превращений, химический же состав при этом не изменяется. Каким же путем можно изменить химический состав поверхностного слоя металла? Чтобы изменить химический состав поверхностного слоя, нужно насытить его необходимыми элементами. Это осуществляется в результате контакта поверхности изделия со средой, в которой содержится в большом количестве необходимый элемент. Наилучший контакт достигается при газовой среде.

В результате длительного контакта при высоких температурах изделия со средой происходит проникновение элемента в поверхность изделия на определенную глубину. При этом протекают два процесса: поглощение поверхностью изделия атомов элемента из окружающей среды и диффузия – проникновение в глубь изделия элемента, который был поглощен поверхностью. Наиболее часто поверхность стальных изделий насыщают углеродом или азотом. Химико – термическая обработка чаще всего преследует следующие цели:

- 1) получить более твердую, износоустойчивую поверхность;
- 2) получить поверхность, устойчивую против коррозии.

Некоторые виды химико – термической обработки одновременно решают обе задачи. В настоящей главе будут рассмотрены наиболее широко применяемые в машиностроении виды химико-термической обработки стали: цементация, азотирование и цианирование.

ЦЕМЕНТАЦИЯ СТАЛИ.

Цементацией называется процесс насыщения поверхности стальных изделий углеродом. Цементации подвергают изделия, которые в основном работают на износ, но в то же время испытывают в процессе работы сотрясения и удары. Такие изделия должны иметь твердую закаленную поверхность, хорошо сопротивляющуюся истиранию, и вязкую сердцевину, способную выдерживать сотрясения и удары. Из какой же стали следует изготавливать указанные изделия? Если их изготовить из стали с высоким содержанием углерода, то после термической обработки поверхность изделия будет твердой и износоустойчивой, но

сердцевина будет твердой и хрупкой. В результате ударных нагрузок такое изделие может разрушиться. Если изделие выполнить из малоуглеродистой стали, то оно будет мягким и вязким, выдержит сотрясения и удары, но зато мягкая поверхность его будет быстро изнашиваться при истирании. Желательную комбинацию свойств можно получить в том случае, если изделие изготовить из малоуглеродистой стали, а затем подвергнуть его цементации. В результате цементации в поверхностном слое будет высокоуглеродистая сталь, а ядро изделия будет состоять из малоуглеродистой стали. После закалки такого изделия поверхность его будет твердой, а сердцевина останется мягкой и вязкой, так как малоуглеродистая сталь не закаливается.

Цементации обычно подвергают стали, содержащие 0,12 – 0,25% углерода. Для сильно нагруженных изделий применяют стали, содержащие специальные элементы: хром, никель и др. В результате цементации содержание углерода в поверхностном слое металла увеличивается до 0,9 – 1,0%. Более высокое содержание углерода нежелательно, так как при этом вокруг зерен перлита образуется хрупкая сетка цементита — поверхностный слой стали становится очень хрупким и может крошиться. Чаще всего цементацию производят на глубину 0,5 – 2 мм. При цементации изделие нагревают до температуры несколько выше критической температуры A_{c3} и длительное время выдерживают в среде, которая содержит значительное количество углерода и способна легко его отдавать. Такие среды называют *карбюризаторами*. В зависимости от вида карбюризатора различают *твердую* и *газовую* цементации.

Твердая цементация. При твердой цементации применяется твердый карбюризатор. Основной составляющей твердого карбюризатора (60 – 90%) является древесный уголь, а иногда торфяной или нефтяной кокс. Для уменьшения усадки карбюризатора используют уголь твердых пород (березовый или дубовый). С этой же целью иногда некоторое количество древесного угля — заменяют коксом. Кроме древесного угля, в состав карбюризатора входят углекислые соли (10 – 40%), чаще всего углекислый барий ($BaCO_3$) и углекислый натрий (Na_2CO_3). Эти соли ускоряют процесс цементации, так как способствуют образованию газовой среды. Так, например, углекислый барий разлагается по следующей реакции: $BaCO_3 = BaO + CO_2$. Образовавшийся углекислый газ CO_2 соединяется с углеродом древесного угля, в результате получается окись углерода: $CO_2 + C = 2CO$. На поверхности изделия окись углерода распадается: $2CO = CO_2 + C$. Выделяющийся атомарный углерод активно поглощается поверхностью изделия и растворяется в аустените. Углекислый барий является наиболее эффективным ускорителем процесса цементации. Его преимущество состоит в том, что он медленно выделяет углекислоту при температурах цементации, обеспечивая тем самым ее постоянный приток. Кроме древесного угля и углекислых солей, в состав карбюризатора входит небольшое количество патоки или мазута. Эти вещества улучшают связь углекислых солей с древесным углем. Иногда в карбюризатор добавляют до 5% углекислого кальция (мела), чтобы не допустить спекания частиц. Широкое применение находит карбюризатор следующего состава (в %):

Древесный уголь.....	75
Углекислый барий.....	15
Углекислый кальций.....	5
Углекислый натрий.....	1
Патока (или мазут).....	4

Карбюризатор после окончания цементации не выбрасывают, а используют вторично, добавив в него 25 – 30% свежего карбюризатора. Состав карбюризатора и его качество оказывают большое влияние на результаты цементации. Древесный уголь карбюризатора должен состоять из частиц размерами 3 – 8 мм, так как при таких размерах обеспечивается хорошая циркуляция газов. Элементы, входящие в состав карбюризатора, должны быть просушены и тщательно перемешаны. Состав карбюризатора должен быть таким, чтобы он

действовал не очень быстро, иначе в поверхностном слое изделий будет слишком большое количество углерода и образуется резкий переход от твердого поверхностного слоя к мягкому внутреннему. Это может вызвать трещины при закалке и привести к отслаиванию цементированного слоя. Однако карбюризатор не должен действовать и слишком медленно, так как это затянет процесс цементации и удорожит его.

Чтобы обеспечить хорошее качество цементации, термист должен уделять большое внимание также подготовке изделий для цементации. Изделия должны быть очищены от окалины, ржавчины, масляных пятен и других загрязнений. Не рекомендуется подвергать цементации изделия, на поверхности которых имеются глубокие риски и забоины. Иногда желательно, чтобы некоторые участки поверхности изделия не подвергались цементации. Такие участки должны быть защищены от соприкосновения с карбюризатором. Наиболее надежной защитой является электролитическое покрытие слоем меди тех мест изделия, которые не должны подвергаться цементации, так как углерод не проникает через слой меди. Более простым способом является обмазка защищаемых мест различными пастами (например, огнеупорной глиной в смеси с асбестовым порошком). Однако этот способ защиты менее надежен, потому что глина при высоких температурах растрескивается и через трещины может проникнуть газ. Для предохранения от цементации резьбы болтов на них навинчивают гайки. Существуют и другие способы защиты.

Процесс твердой цементации осуществляется следующим образом. Изделия, подлежащие цементации, укладывают в цементационные ящики, которые свариваются из малоуглеродистой стали толщиной 6 – 7 мм либо отливаются из жароупорной стали или из чугуна. Ящики из чугуна тяжелее железных и прогреваются более медленно. Следует иметь в виду, что на нагрев ящика до температуры цементации затрачивается много времени, поэтому необходимо применять ящики рациональной конструкции. Это не только сокращает продолжительность процесса, но и улучшает качество цементации. Цементацию мелких изделий на небольшую глубину рекомендуется осуществлять в ящиках небольших размеров (длина 500 мм, ширина 300 мм и высота 250 – 300 мм). Хорошие результаты достигаются в тех случаях, когда форма цементационного ящика приближается к форме обрабатываемых изделий. Так, для цементации шестерен, осей и втулок более выгодно применять ящики цилиндрической формы с вваренной в дно трубкой, которая способствует более быстрому выравниванию температур. При использовании таких ящиков время пребывания изделий в печи сокращается на 20 – 25%. Изделия следует располагать в цементационном ящике так, чтобы они не соприкасались друг с другом и не прикасались к стенкам ящика. Расстояние между изделиями должно быть не менее 15 – 20 мм, а между изделием и стенкой ящика – 20 – 25 мм. Это пространство заполняют карбюризатором и утрамбовывают его. На дно ящика тоже насыпают слой карбюризатора толщиной 40 – 50 мм. Самый верхний слой карбюризатора должен иметь толщину 30 – 40 мм.

Общий вес карбюризатора в ящике обычно составляет 10 – 15% от веса цементируемых изделий.

Пример правильной упаковки цементируемых изделий приведен на рис. 82. После укладки изделий ящик плотно закрывают крышкой, а щели замазывают глиной, чтобы в ящик не попадал воздух (при попадании его будет бесполезно выгорать карбюризатор, а также может иметь место окисление изделия). В крышке или стенке ящика делают несколько отверстий, в которые вставляют прутки диаметром около 10 мм, изготовленные из той же стали, что и цементируемое изделие. Эти прутки называют «свидетелями». Они необходимы для контроля процесса цементации. Кроме свидетелей, вместе с изделиями в ящики укладывают

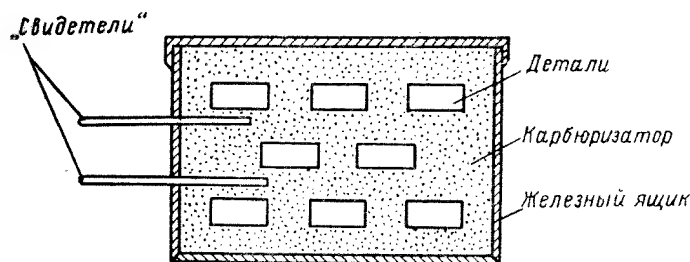


Рис. 82. Упаковка деталей в цементационном ящике.

контрольные образцы. Упакованные ящики загружают в печь, предварительно нагретую до 600 – 700°, и медленно нагревают до температуры цементации. Если ящики не имеют ножек, то рекомендуется ставить их на подставки. Между ящиками должно быть расстояние 50 – 75 мм, а между ящиками и дверцей печи – не менее 100 – 150 мм. Это необходимо для равномерного нагрева ящиков со всех сторон.

Температура и продолжительность цементации. Большое значение для результатов обработки имеет температура цементации. Известно, что α -железо растворяет ничтожное количество углерода. Поэтому, если проводить цементацию при температурах, лежащих ниже точки A_{c1} (723°), то на поверхности изделия образуется лишь тонкая пленка цементита, и дальнейшее проникновение (диффузия) атомов углерода в глубь изделия будет затруднено. Чтобы железо поглощало углерод, нужно α -железо перевести в γ -железо, которое способно растворить до 2% углерода. Таким образом, для цементации необходимо нагреть сталь до образования структуры аустенита. Практически цементацию производят при температурах 870 – 920°, т. е. $A_{c3} + (20 \pm 500)$. Нужно ли производить цементацию при более высоких температурах?

Для ускорения процесса это весьма желательно, так как по мере повышения температуры скорость проникновения углерода в сталь быстро возрастает. Однако слишком высокая температура цементации является нежелательной из-за быстрой порчи цементационных ящиков, а также ввиду роста зерен аустенита. Кроме того, при повышенной температуре цементации наблюдается более резкий переход от цементированного слоя к сердцевине. В последнее время всё же часто применяют более высокие температуры цементации (950 – 975°), при этом время цементации сокращается примерно на $\frac{1}{3}$. Такой режим обработки может быть особенно рекомендован при цементации изделий из углеродистой стали на небольшую глубину, так как указанные недостатки структуры здесь не так сильно проявляются и сравнительно легко устраняются последующей термической обработкой. Не следует изготавливать цементируемые изделия из кипящей стали ввиду повышенного содержания в ней кислорода. При цементации такой стали на поверхности часто получаются мягкие пятна. Продолжительность выдержки изделия при температуре цементации устанавливается в зависимости от требуемой глубины цементации. Время выдержки зависит также от температуры цементации и состава карбюризатора. В табл. 12 ориентировочно указана продолжительность выдержки в зависимости от глубины и температуры цементации при содержании в карбюризаторе 30% углекислого бария.

Таблица 12. Продолжительность выдержки при цементации.

Глубина слоя (в мм.)	Продолжительность выдержки (в часах) при температуре цементации	
	900°	930°
0,4	3	2,75
0,8	6	5
1,2	8	6,5
1,6	10	8
2,0	12	9,5
2,4	14	11

Охлаждение ящиков после окончания цементации целесообразнее, всего производить на воздухе. Более медленное охлаждение (с печью) удлиняет процесс и способствует образованию грубой цементной сетки в поверхностном слое.

Контроль процесса. Глубину цементированного слоя определяют следующим образом. Когда время выдержки изделия при температуре цементации заканчивается, один из свидетелей извлекают из ящика, закалывают в воде и разламывают ударом молотка. В изломе будут видны крупнозернистая сердцевина и тонкий наружный матовый ободок. По ширине этого ободка и судят о глубине цементации. Граница цементированного слоя выявится более резко, если торец свидетеля зачистить на наждачном круге и протравить кислотой. Для более

точного контроля результатов цементации из образцов, заложенных в ящики вместе с изделиями, изготавливают микрошлифы и по ним определяют глубину и структуру цементированного слоя.

Структура цементированной стали. Сталь, подвергнутая цементации, имеет неодинаковый химический состав и структуру. В различных слоях стали (изделия) содержится неодинаковое количество углерода: в поверхностном слое 0,9 – 1%, а по мере удаления от поверхности количество углерода постепенно уменьшается. В сердцевине изделия остается то же количество углерода, которое было в нем до цементации.

Структура цементированной стали представлена на рис. 83. Из этого рисунка видно, что поверхностный слой состоит из перлита и цементита, т. е. имеет структуру заэвтектоидной стали; далее идет зона эвтектоидной стали, состоящая сплошь из перлита; ниже расположена переходная зона, содержащая феррит и перлит. По мере приближения к сердцевине изделия перлита становится всё меньше, а количество феррита увеличивается.

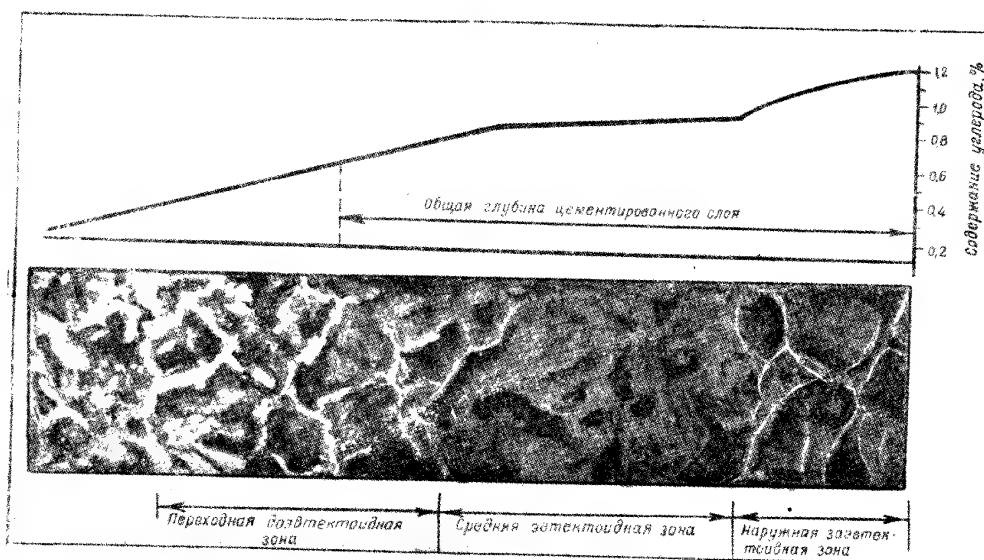


Рис. 83. Структура цементированной стали.

Глубиной цементации называют расстояние от поверхности изделия до появления зерен феррита. Ее определяют как среднее значение из трех-четырех измерений (рис. 84): $\text{глубина цементации} = d_1 + d_2 + d_3 / 3$. Благодаря цементации твердость поверхностного слоя изделия увеличивается примерно в 1,5 раза, но она еще далеко недостаточна для того, чтобы изделие хорошо сопротивлялось износу в процессе трения.

Что же достигается цементацией? В результате цементации получается выгодное распределение в стали углерода: высокое содержание его на поверхности и низкое — в сердцевине, что дает возможность увеличить твердость поверхностного слоя изделия путем его термической обработки в 5 раз по сравнению с твердостью изделия до цементации. Термическая обработка цементированных изделий преследует в основном следующие цели:

- 1) сделать зерно стали более мелким (так как в процессе цементации структура стали становится крупнозернистой);
- 2) повысить твердость цементированного слоя и обеспечить получение структуры мелкоигольчатого мартенсита.

Иногда, кроме указанного, термическая обработка преследует еще одну цель: разрушить сетку цементита в поверхностном слое. Цементированные изделия подвергаются различным

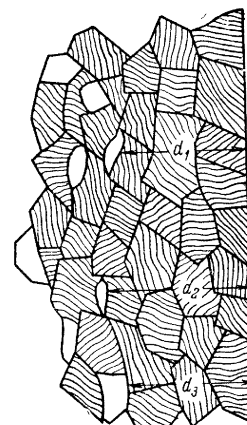


Рис. 84. Схема измерения глубины цементации.

видам термической обработки (в зависимости от их назначения и марки стали).

Наиболее простым и дешевым способом является закалка изделий в воде сразу с цементационного нагрева или после небольшого подстуживания с последующим отпуском при температурах 180 – 200° для снятия внутренних напряжений.

В результате такой термической обработки перегрев стали, полученный во время цементации, не устраняется. Изделие имеет низкую вязкость в сердцевине и твердый, но хрупкий поверхностный слой, так как структура стали состоит из крупноиглочатого мартенсита. Этот вариант термической обработки может применяться для малоответственных изделий или для изделий, изготовленных из наследственно мелкозернистой стали. Чаще всего изделия после цементации охлаждаются до комнатной температуры и лишь после этого подвергаются вторичному нагреву для термической обработки. Для более ответственных цементированных изделий рекомендуется термическая обработка, состоящая из следующих операций:

1) нагретое до температур 850 – 900° изделие подвергается нормализации или закалке в масле для получения мелкозернистой структуры в сердцевине и устранения цементитной сетки в поверхностном слое;

2) изделие температурой 760 – 780° подвергается закалке в воде для получения структуры мелкоиглочатого мартенсита в поверхностном слое;

3) производится отпуск при температурах 150 – 200° для снятия внутренних напряжений после закалки. В результате такой термической обработки поверхностный слой изделия будет иметь структуру мелкоиглочатого мартенсита, а сердцевина будет состоять из мелкозернистого феррита и перлита или из феррита и мартенсита (в зависимости от сорта стали). Кроме указанных, существуют и другие варианты термической обработки цементированных изделий. Твердость цементированного слоя после термической обработки должна составлять $H_{RC} = 56$.

Газовая цементация. Процесс твердой цементации протекает весьма продолжительное время, что объясняется главным образом малой скоростью прогрева цементационного ящика, наполненного плохо проводящим тепло карбюризатором. Кроме того, много времени занимает упаковка изделий в ящики. Время цементации можно значительно сократить, если вместо твердого использовать карбюризатор в виде газовой среды. Такая цементация называется газовой. При газовой цементации изделия нагреваются в печах, через которые с определенной скоростью проходит цементирующий газ, содержащий углерод. Этот газ омывает изделия, а углерод поглощается поверхностью изделия и постепенно проникает вглубь. Для цементации применяют светильный газ (естественный и генераторный), а также газы, полученные путем пиролиза (разложения) керосина и масел. Газовую цементацию осуществляют в печах непрерывного действия с муфелями и без муфелей. Цементирующий газ подается в печи по трубам. Широкое распространение получили также шахтные печи с вентилятором (см. рис. 104), в которых цементирующий газ получается прямо в рабочем пространстве печи при разложении керосина. Керосин вводят в печь капельницей в количестве 80 – 120 капель в минуту, а после достижения нужной температуры цементации подачу керосина уменьшают до 25 – 30 капель в минуту. Из капель керосина в печи при высоких температурах образуются газы, главным образом метан (CH_4) и углерод. На московском станкостроительном заводе «Красный пролетарий» продолжительность процесса цементации изделий в шахтных печах типа Ц при использовании керосина составляет:

при глубине слоя 0,3 – 0,5 мм.....	2,5 – 3,5 часа
при глубине слоя 0,5 – 0,8 мм.....	3,5 – 5,0 часов
при глубине слоя 0,8 – 1,0 мм.....	5,0 – 6,0 часов
при глубине слоя 1,0 – 1,5 мм.....	6,5 – 8,5 часа

Термическая обработка изделий после газовой цементации почти ничем не отличается от обычной. Основным преимуществом газовой цементации по сравнению с твердой является меньшая продолжительность процесса, так как отпадает необходимость нагревать ящики и

твердый карбюризатор. Кроме того, достигается экономия средств, потому что не нужно доставлять и хранить большое количество твердого карбюризатора. Следует отметить также, что условия труда рабочих при газовой цементации значительно лучше, чем при твердой цементации. Указанные преимущества обеспечили широкое применение в машиностроении газовой цементации. Работники Московского автомобильного завода им. Лихачева разработали и внедрили в производство способ *скоростной высокотемпературной газовой цементации* шестерен при нагреве токами высокой частоты. Цементация проводится при температуре 1100°, что позволяет значительно ускорить процесс насыщения поверхности изделия углеродом. Этот способ дает возможность получить цементированный слой глубиной в 1 мм за 50 мин., т. е. в 7 – 8 раз быстрее, чем при обычной газовой цементации. При скоростной газовой цементации хромомарганцево-титановых сталей (18ХГТ и 30ХГТ), отличающихся малой склонностью к росту зерна, одновременно осуществляется и их закалка (после подстуживания до температуры 870°).

Брак при цементации. При цементации наиболее часто встречаются следующие дефекты:

- 1) глубина цементированного слоя не соответствует заданной техническими условиями;
- 2) слишком высокое или, наоборот, недостаточное содержание углерода в поверхностном слое;
- 3) резкий переход от цементированного слоя к сердцевине (по содержанию углерода);
- 4) наличие отдельных мягких мест (пятен) на поверхности;
- 5) отслаивание цементированного слоя. Причиной возникновения указанных дефектов является чаще всего несоблюдение технологии процесса.

Чрезмерная или недостаточная глубина цементированного слоя получается главным образом вследствие неправильно установленного времени выдержки. Если выдержка слишком велика, то глубина слоя получается больше заданной, и наоборот. Необходимо иметь в виду, что если глубина цементации получилась больше требуемой, то такой брак неисправим. Слишком высокое содержание углерода в цементированном слое получается главным образом вследствие применения очень сильного карбюризатора, содержащего большое количество углекислых солей, и при слишком высокой температуре цементации. Пониженное содержание углерода в цементированном слое наблюдается в тех случаях, когда карбюризатор содержит недостаточное количество углекислых солей и поэтому насыщение поверхности изделия углеродом протекает вяло. Резкий переход от цементированного слоя к сердцевине вызван чаще всего слишком высокой температурой цементации, особенно в начале процесса. При этом поглощение углерода поверхностью протекает быстрее, чем диффузия его в глубину. В результате возникает резкая граница между цементированным слоем и сердцевиной изделия. Этот дефект влечет за собой при дальнейшей закалке изделия отделение (отслаивание) цементированного слоя. Мягкие пятна чаще всего являются результатом небрежной подготовки изделий к цементации: либо изделия были плохо очищены и на них остались окалина, грязь, масляные пятна, либо был плохо утрамбован карбюризатор и отдельные участки изделия в процессе цементации обнажились. Из изложенного очевидно, что при проведении цементации и последующей термической обработки изделий необходимо очень тщательно соблюдать технологический режим.

АЗОТИРОВАНИЕ.

При необходимости получить высокую твердость и коррозионную стойкость поверхности изделия на небольшой глубине (0,1 – 0,5 мм) применяют химико-термическую обработку – *азотирование*. Сущность процесса азотирования заключается в насыщении поверхности изделия азотом. Этот процесс основан на способности железа при определенных условиях поглощать и растворять в себе атомарный азот. Поверхность азотированного изделия отличается очень высокой твердостью, кроме того, она хорошо сопротивляется коррозии в таких средах, как вода, пар, некоторые кислоты и соли.

Повышение твердости и коррозионной устойчивости изделия при азотировании достигается благодаря образованию в его поверхностном слое очень измельченных химических соединений азота с металлами – нитридов. Эти нитриды придают стали очень высокую естественную твердость, поэтому после азотирования не требуется никакой дополнительной термической обработки ее. В этом состоит принципиальное отличие азотирования от цементации и преимущество процесса азотирования. Для достижения хороших результатов изделия перед азотированием должны быть очищены от ржавчины, грязи и масла (пескоструйная очистка и обезжиривание поверхности).

Процесс азотирования происходит следующим образом. Изделия загружают в плотно закрывающийся муфель, который помещают в электрическую печь. По трубке в муфель подается аммиак (NH_3), предварительно пропущенный через поглотитель влаги. Процесс азотирования протекает при температурах $500 - 600^\circ$. При этих температурах аммиак диссоциирует (разлагается) на свои составные части – азот и водород: $2\text{NH}_3 = 3\text{H}_2 + 2\text{N}$. Образовавшийся атомарный азот поглощается поверхностью изделий, а водород с неразложившейся частью аммиака выходит из муфеля по отводящей трубке. Отходящие газы проходят через диссоциометр – прибор который служит для определения степени диссоциации аммиака – этого важного показателя течения процесса. Обычно при азотировании диссоциация аммиака поддерживается в пределах $25 - 40\%$, т. е. ведут процесс так, чтобы диссоциировало только $25 - 40\%$ аммиака. При диссоциации свыше 60% аммиака глубина азотированного слоя уменьшается, а твердость поверхности изделия понижается, так как на ней накапливается водород, который препятствует взаимодействию металла с азотом и, кроме того, вызывает обезуглероживание стали.

Проникновение азота в сталь при обычных условиях азотирования протекает чрезвычайно медленно (во много раз медленнее диффузии углерода при цементации стали). Поэтому для образования азотированного слоя требуется довольно много времени (ориентировочно, около 10 час. для получения слоя глубиной $0,1 \text{ мм}$). Влияние температуры азотирования на глубину и твердость азотированного слоя при выдержке 50 час. показано на рис. 85. Из приведенной диаграммы видно, что чем выше температура процесса, тем толще получается азотированный слой. Однако для получения высокой твердости поверхности процесс следует вести при температурах не выше 520° . При более высоких температурах наблюдается резкое понижение твердости поверхностного слоя. При температурах ниже 500° также не рекомендуется вести процесс, так как в этом случае сталь насыщается азотом в недостаточной степени. Для ускорения процесса азотирования в последнее время широко применяют ступенчатый нагрев: изделия выдерживают 12 – 15 час. при температурах $510 - 520^\circ$, а затем нагревают до $550 - 600^\circ$ и выдерживают при этих температурах от 8 до 20 час, в зависимости от толщины слоя. Сравнительно небольшая выдержка изделий при температурах $550 - 600^\circ$ не приводит к значительному понижению их твердости, но зато способствует более глубокому проникновению в сталь азота. При ступенчатом азотировании продолжительность процесса удается сократить в 1,5 – 2 раза. По окончании азотирования изделия медленно (со скоростью $200 - 300^\circ$ в час) охлаждают до температуры $200 - 250^\circ$ с тем, чтобы в них не осталось внутренних напряжений. Охлаждение, так же как и нагрев, должно производиться в закрытой печи в атмосфере аммиака во избежание окисления поверхности изделия. Иногда необходимо азотировать только часть поверхности изделия. В этих случаях места, не подлежащие

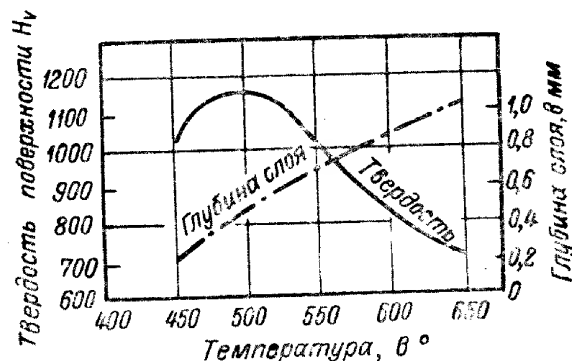


Рис. 85. Влияние температуры азотирования на глубину и твердость азотированного слоя (H_v – обозначение твердости, определенной на приборе Виккерса).

азотированию, покрывают гальваническим путем слоем олова. При азотировании олово расплавляется (температура плавления его 232°) и покрывает поверхность тонкой пленкой, которая препятствует проникновению в сталь азота. Слой олова должен быть очень тонким (не более 10 – 15 мк), чтобы оно не стекало на смежные участки, подлежащие азотированию. Для предохранения части поверхности от азотирования ее можно покрыть в 2 – 3 слоя жидким стеклом. Каждый слой жидкого стекла высушивается при температурах 100 – 120° . Если азотированию подвергается часть изделия (например, только шейка коленчатого вала), то она покрывается особым лаком, а затем изделие погружается в расплавленное олово. К поверхностям, покрытым лаком, олово не будет приставать, и они подвергнутся азотированию. Не все стали рационально азотировать. Углеродные стали не пригодны для азотирования, если требуется высокая твердость поверхностного слоя. Это объясняется тем, что железо с азотом дает очень непрочные, легко распадающиеся нитриды. Хорошие результаты получаются при азотировании сталей, содержащих алюминий, хром, молибден. Особенно полезной примесью в этом отношении является алюминий. Он значительно ускоряет процесс азотирования и образует с азотом очень твердые и устойчивые нитриды. В промышленности наиболее часто азотируются изделия из стали марки 38ХМЮА, содержащей 0,38% углерода, около 1% алюминия, 1,5% хрома и 0,2% молибдена. Азотирование является одной из завершающих операций обработки изделия. Азотированные изделия подвергаются только шлифованию. Механическая и термическая обработка изделия производится до азотирования.

Для прочности и вязкости стали в сердцевине изделия перед азотированием подвергают термической обработке – закалке и последующему высокому отпуску, в результате чего получают структуру сорбита. Изделия, изготовленные из стали марки 38ХМЮА, закалывают при температурах $920 - 940^{\circ}$ с охлаждением в масле. Отпуск проводится при температурах $630 - 650^{\circ}$. Температура отпуска ни в коем случае не должна быть ниже температуры азотирования, в противном случае при азотировании будет происходить дополнительное снятие закалочных напряжений, что может привести к искривлению изделия. В результате азотирования сталь немного увеличивает свой объем. Размеры изделия при этом увеличиваются на 0,005 – 0,008 мм на сторону. Указанное изменение размеров должно быть учтено при изготовлении изделий. Результаты азотирования контролируются в основном путем измерения твердости поверхности. Определение твердости азотированного слоя производится на приборе Виккерса вдавливанием в изделие алмазной пирамиды под нагрузкой 3 – 5 кг или на приборе Роквелла алмазным конусом под нагрузкой 15 кг. При использовании больших нагрузок тонкий азотированный слой продавится, и результаты испытания будут неправильные. В переводе на числа Бринелля твердость азотированного слоя составляет $H_B = 900 - 1000$, что почти в 1,5 раза превышает твердость закаленного цементированного слоя. Такую высокую твердость азотированный слой сохраняет и при нагреве изделия до температур $500 - 550^{\circ}$. Следует, однако, отметить, что азотированный слой отличается значительной хрупкостью. К недостаткам азотирования относятся длительность процесса, а также возможность обработки в основном только легированных сталей. Азотируют шейки валов, клапаны, шестерни, калибры, шаблоны и другие изделия, которые в процессе работы подвергаются сильному истиранию и испытывают в то же время толчки и удары. Иногда изделие подвергают азотированию только для того, чтобы получить поверхностный слой, устойчивый против коррозии, при этом не преследуется цель повышения твердости поверхности изделия. Такому азотированию могут подвергаться изделия и из обычной углеродистой стали.

Антикоррозийное азотирование осуществляется при температурах $600 - 700^{\circ}$ в течение 30 – 60 мин. Толщина защитного слоя составляет 0,02 – 0,04 мм. Азотированные изделия обладают хорошей устойчивостью против коррозии в воде, во влажной атмосфере и в других слабодействующих средах. Так, например, азотированная углеродистая сталь (температура процесса 700° , продолжительность – 30 мин.) в погруженном в воду состоянии не подвергается коррозии в течение 720 час.

ЦИАНИРОВАНИЕ.

Цианированием называется такая химико-термическая обработка, при которой поверхность изделия одновременно насыщается углеродом и азотом. Цианирование применяется в тех случаях, когда на изделии необходимо получить тонкий поверхностный слой высокой твердости. Цианирование можно проводить в расплавленных солях, содержащих циан (CN), и в газовой среде, состоящей из смеси аммиака и цементирующего газа. В первом случае цианирование называется *жидкостным* а во втором – *газовым*. В зависимости от температур, при которых протекает процесс, различают *низкотемпературное* цианирование, осуществляющееся при температурах 500 – 600°, и *высокотемпературное* – при температурах 800 – 900°. Низкотемпературное цианирование (как жидкостное, так и газовое) применяется для повышения стойкости инструмента из быстрорежущей стали. Оно является завершающей операцией и производится уже после термической обработки инструмента. После низкотемпературного цианирования изделия медленно охлаждаются. Высокотемпературное цианирование применяется с целью получения твердого, хорошо сопротивляющегося истиранию поверхностного слоя и вязкой сердцевины у изделий из стали, содержащей 0,2 – 0,4% углерода. После высокотемпературного цианирования изделия подвергают закалке и последующему низкому отпуску.

Жидкостное цианирование. Процесс жидкостного высокотемпературного цианирования заключается в следующем. Изделия погружают в расплавленную соляную ванну, состоящую из смеси цианистых и нейтральных солей, выдерживают там некоторое время, а затем непосредственно из ванны закаливают в воде или масле. При цианировании атомы углерода и азота проникают в поверхностный слой изделия и образуют с железом карбиды и нитриды. Цианистые соли (NaCN, KCN, Ca(CN)₂ и др.) имеют низкую температуру плавления (550—650°). При высоких температурах они разлагаются и испаряются. Для повышения температуры плавления ванны и уменьшения испарения дорогостоящих цианистых солей к ним добавляют более дешевые и химически стойкие нейтральные соли: соду, поваренную соль, хлористый барий и др. Наиболее часто применяются цианистые ванны следующего состава: 20—30% (по весу) цианистого натрия, остальное — сода. В процессе работы содержание циана в соляной ванне уменьшается, или, как принято говорить, ванна истощается. Поэтому через определенные промежутки времени (1,5 – 2 часа) в ванну добавляют небольшие порции цианистой соли (по 3% от веса всей соли). При освежении ванны выделяется пена, которую нужно удалять. В процессе цианирования ванну следует периодически очищать, удаляя из нее все осадки. Для уменьшения летучести и окисляемости цианистых соединений поверхность ванны на время работы покрывают слоем угольного порошка или чешуйчатого графита.

Высокотемпературное жидкостное цианирование рекомендуется производить при температурах 800—820°. При более высоких температурах ванна сильно дымит, а цианистые соединения при этом улетучиваются. Длительность выдержки изделия в ванне зависит от глубины цианированного слоя, состава ванны и ее температуры. Чаще всего она колеблется в пределах от 10 до 60 мин. Например, при содержании в ванне 30% цианистых солей и температуре 820° слой глубиной 0,1 мм получается при выдержке 10 мин., а слой глубиной 0,2 мм – при выдержке 40 мин. Наиболее часто производят жидкостное цианирование на глубину 0,1 – 0,3 мм. По окончании цианирования изделия сразу же подвергают закалке. В зависимости от требуемой твердости поверхностного слоя и состава цианируемой стали закалка производится в воде или в минеральных маслах. Применять для закалки растительное масло нельзя, так как оно под влиянием продуктов цианистых солей омыливается и снижает эффект закалки. После закалки детали подвергают отпуску при температурах 180 – 200° в течение 30 мин. Твердость закаленного цианированного слоя $H_R = 63 - 65$. В зависимости от температуры процесса в цианированном слое содержится 0,4 – 0,7% углерода и 0,5 – 0,6% азота. Чем выше температура процесса, тем меньше в цианированном слое азота, так как нитриды железа обладают слабой устойчивостью и при

высоких температурах распадаются, и больше углерода, потому что при высоких температурах образуется γ -железо, которое хорошо растворяет углерод. Жидкостное цианирование имеет ряд важных преимуществ по сравнению с цементацией:

- 1) процесс протекает значительно быстрее;
- 2) термическая обработка производится сразу после окончания цианирования;
- 3) достигается более высокая поверхностная твердость.

К недостаткам жидкостного цианирования относятся дороговизна процесса вследствие большого расхода цианистых солей (в 2 раза дороже, чем цементация), а также сильная ядовитость цианистых солей. При жидкостном цианировании должны строго соблюдаться следующие основные правила техники безопасности:

1. Цианистые ванны должны иметь защитные кожухи и находиться в изолированных помещениях с сильной вытяжной вентиляцией.
2. Ни в коем случае нельзя вводить цианистые соли в ванны, содержащие соли-окислители (селитра, хромпик и др.), так как при этом неизбежен взрыв. По этой же причине нельзя переносить инструмент из цианистой ванны в селитровую, и наоборот.
3. Добавлять в цианистую ванну соли, а также загружать в нее детали и извлекать их оттуда можно только в резиновых перчатках и защитных очках во избежание серьезных отравлений.
4. Загружаемые в ванну изделия, инструменты и приспособления должны быть совершенно сухими, иначе может произойти взрыв от образования паров.
5. После закалки цианированные детали необходимо нейтрализовать и тщательно промыть. Нейтрализацию осуществляют в течение 5 – 10 мин. в воде с добавкой $\sim 5\%$ (по весу) железного купороса. Промывают изделия не менее 5 мин. в воде температурой не ниже 70° .
6. Нельзя выносить из цианистого отделения спецодежду и инструменты.
7. Категорически запрещается принимать пищу и курить в помещении, где происходит цианирование.
8. После окончания работ, а также перед обеденным перерывом необходимо тщательно вымыть руки.

Газовое цианирование. Газовое цианирование (иногда его называют нитроцементацией) является высокопроизводительным, дешевым и менее вредным процессом чем жидкостное цианирование. При газовом цианировании насыщение поверхности изделия углеродом и азотом осуществляется в газовой среде, состоящей из смеси цементирующего и азотирующего газов. Смесь содержит 70 – 75% (по объему) цементирующего газа и 25 – 30% азотирующего. В качестве цементирующего газа применяют естественный и генераторный газы, а также пиробензол, а в качестве азотирующего — аммиак. Газовое цианирование может производиться в тех же печах, что и газовая цементация и азотирование. Процесс газового цианирования ведется следующим образом. Цианируемые изделия закладывают в печь, а дверцы ее плотно закрывают. После этого печь нагревают и пропускают только один цементирующий газ. Когда печь нагреется до требуемой температуры, вместе с цементирующим газом пропускают и аммиак. В последнее время газовое цианирование осуществляется путем введения в рабочее пространство печи пиробензола. Аммиак подается в печь по трубке прямо из баллона и смешивается вентилятором с парами пиробензола. Это упрощает процесс, так как не требуется сложной установки для получения науглероживающего газа. Высокотемпературное газовое цианирование производится при температурах $830 - 850^\circ$ с последующей закалкой и отпуском изделия. Продолжительность выдержки изделия при температуре цианирования составляет примерно 1 час для получения слоя толщиной 1 мм. Низкотемпературное газовое цианирование инструментов из быстрорежущей стали производится при температурах $540 - 550^\circ$ с выдержкой от 0,5 до 3 час. Глубина цианированного слоя при этом составляет 0,02 – 0,06 мм. Низкотемпературное газовое цианирование является завершающей операцией обработки изделия. Оно производится после термической обработки, шлифования, заточки и окончательной отделки инструмента. Скорость газового цианирования в 3 – 6 раз меньше скорости жидкостного цианирования. Основным преимуществом газового цианирования по сравнению с

жидкостным является безопасность работы. Кроме того, процесс газового цианирования легко поддается автоматизации и поэтому особенно эффективен при массовом и крупносерийном производстве.

Глава XI.

ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ И ИХ ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА. ХАРАКТЕРИСТИКА ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ И ИХ МАРКИРОВКА.

В предыдущих главах были рассмотрены строение углеродистой стали, ее свойства и термическая обработка. Однако углеродистая сталь не всегда удовлетворяет тем требованиям, которые предъявляет к материалам современная техника. Применение углеродистой стали ограничивается по следующим причинам:

- 1) неглубокая прокаливаемость углеродистых сталей позволяет получить необходимую однородную структуру лишь в сравнительно мелких и тонкостенных изделиях;
- 2) в углеродистых сталях трудно одновременно сочетать такие качества, как высокая прочность, вязкость и пластичность;
- 3) углеродистые стали малоустойчивы против отпуска;
- 4) углеродистая сталь не обладает в ряде случаев необходимыми физическими и химическими свойствами.

Поэтому наряду с углеродистой сталью в промышленности широко применяются более дорогие стали сложного химического состава, которые называются легированными. Эти стали содержат, кроме обычных примесей (марганца, кремния, серы и фосфора), еще специально введенные элементы, обеспечивающие получение тех или иных свойств стали. Элементы, которые специально добавляются в сталь в процессе ее выплавки, называют легирующими элементами. В качестве легирующих элементов чаще всего применяют никель, хром, вольфрам, молибден, титан, ванадий, алюминий, медь и кобальт. Кремний и марганец, если они специально введены в сталь, также являются легирующими элементами. В этом случае содержание в стали кремния превышает 0,5%, а марганца – 0,8%. Большинство легированных сталей содержит два или три легирующих элемента. Это объясняется тем, что совместное действие нескольких легирующих элементов значительно сильнее, чем одного, даже при значительном его содержании в стали. Название легированной стали определяется основными легирующими элементами, входящими в ее состав, например: никелевая, хромоникелевая, хромомарганцовистая и т. п.

При выборе легированных сталей важную роль играют экономические соображения. Следует иметь в виду, что такие легирующие элементы, как марганец, кремний и хром, недефицитны и поэтому незначительно удорожают сталь; никель уже заметно повышает стоимость стали; особенно же сильно удорожают сталь такие элементы, как кобальт, вольфрам, молибден, даже при незначительном их содержании в стали. Легированные стали применяются во всех отраслях машиностроения. В зависимости от области использования легированные стали делятся на три группы:

- 1) конструкционные – для изготовления деталей машин и конструкций;
- 2) инструментальные – для изготовления инструментов;
- 3) с особыми физическими и химическими свойствами – нержавеющие, немагнитные, жароупорные и т. д.

Существует множество марок легированной стали, которые объединяются государственными стандартами: на конструкционные легированные стали имеется ГОСТ 4543 – 57, на инструментальные – ГОСТ 5950 – 51, на стали с особыми свойствами – ГОСТ 5632 – 51. Легированные стали маркируются буквами и цифрами, характеризующими химический состав стали. Буквы обозначают:

Г – марганец; С – кремний; Х – хром; Н – никель; В – вольфрам; К – кобальт;

М – молибден; Т – титан; Ф – ванадий; Ю – алюминий; Д – медь; Р – бор.

Цифры, стоящие в начале марки, указывают примерное содержание углерода в стали. В

марках конструкционных сталей первые две цифры указывают на среднее содержание углерода в сотых долях процента. У инструментальной легированной стали в начале марки стоит одна цифра, которая показывает содержание углерода в десятых долях процента. Если инструментальная сталь содержит 1% углерода и более, то цифра не ставится. Цифры за буквами указывают на содержание соответствующего легирующего элемента в процентах. Если легирующего элемента в стали менее 1%, то цифра после буквы не ставится. Приведем в качестве примера несколько марок конструкционной и инструментальной стали: 40X – хромистая конструкционная сталь, содержащая 0,4% углерода; 25ХМ – хромомолибденовая конструкционная сталь с 0,25% углерода; 9ХС – инструментальная хромисто – кремнистая сталь, содержащая 0,9% углерода; X – инструментальная хромистая сталь с содержанием углерода около 1 %; 30ХНЗ – хромоникелевая сталь, содержащая 0,3% углерода, около 1% хрома и около 3% никеля. В конце обозначения некоторых марок стали ставится буква А (например, 12ХНЗА, 60С2А). Наличие этой буквы в марке указывает, что сталь высококачественная, т. е. имеет пониженное содержание вредных примесей (серы и фосфора). Высококачественные стали имеют такую же прочность, как и качественные (без буквы А), но вязкость их несколько выше.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СТАЛИ.

Как известно, свойства любого материала, в том числе и металла, определяются его строением. Чтобы разобраться в свойствах легированных сталей, необходимо ознакомиться с особенностями их строения. Напомним, что углеродистая сталь в отожженном состоянии всегда состоит из феррита и цементита, которые могут располагаться отдельно друг от друга или в виде механической смеси (перлита). Легирующие элементы в структуре стали в основном распределяются следующим образом:

1) растворяются в железе; 2) растворяются в цементите; 3) образуют с углеродом новую структурную составляющую – устойчивые химические соединения, которые называются специальными карбидами (карбид вольфрама WC, карбид молибдена MoC и др.). Карбиды отличаются измельченной формой, большой твердостью и значительной хрупкостью. Таким образом, структурными составляющими легированных сталей являются легированный феррит, легированный цементит и специальные карбиды.

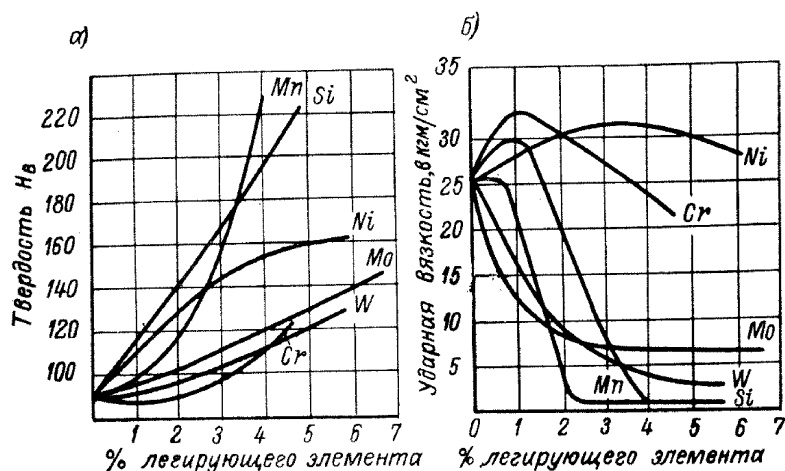
Распределение легирующих элементов между указанными структурными составляющими зависит в основном от характера их взаимодействия с железом и углеродом. Все легирующие элементы в том или ином количестве могут растворяться в феррите. Такие элементы, как марганец, хром, кремний, никель и алюминий, способны растворяться в феррите в очень больших количествах, титан и медь растворяются в феррите в очень малых количествах (медь не более 1%). По отношению к углероду легирующие элементы делятся на две группы:

1) карбидообразующие, которые образуют с углеродом устойчивые химические соединения – карбиды; к этой группе относятся хром, марганец, молибден, вольфрам, ванадий, титан и др.;

2) не образующие карбидов в стали; к ним относятся никель, кремний, алюминий, кобальт и медь.

Карбидообразующие легирующие элементы могут располагаться в феррите, цементите, а также в виде специальных карбидов. Легирующие элементы, которые не образуют карбидов, всегда находятся в виде твердого раствора в феррите или аустените. По своему строению, а следовательно и свойствам феррит легированной стали отличается от феррита углеродистой стали. В кристаллической решетке феррита легированной стали, кроме атомов железа и углерода, располагаются также атомы легирующих элементов (например, хрома, никеля и др.). Кристаллическая решетка искажена, ввиду чего имеет место упрочнение феррита. Все легирующие элементы, растворенные в феррите, в той или иной мере упрочняют его. Влияние различных легирующих элементов на механические свойства феррита показано на рис. 86. Приведенные кривые характеризуют влияние легирующих элементов на твердость и

прочность феррита, так как известно, что между твердостью и прочностью существует прямая зависимость. Из этого рисунка мы видим, что сильное влияние на прочность и твердость феррита оказывают марганец, кремний и никель. Наиболее ценным из трех указанных элементов является никель, который, упрочняя феррит одновременно несколько повышает и его вязкость.



86. Влияние легирующих элементов на твердость (а) и вязкость (б) феррита.

При содержании в стали более 1% марганца наряду с увеличением твердости и прочности металла имеет место значительное снижение его ударной вязкости. Примерно в таком же направлении влияет на сталь и кремний. Поэтому в конструкционных сталях, где требуется высокая вязкость, содержание кремния и марганца не превышает 1%, а содержание никеля достигает 3 – 4%.

Изменение свойств стали в результате ее легирования определяется количеством введенных в сталь легирующих элементов и характером их распределении между структурными составляющими. В конструкционных сталях легирующие элементы растворены в феррите, а в инструментальных сталях они в основном находятся в цементите или в виде специальных карбидов. Наиболее полное использование свойств легирующих элементов достигается лишь в результате термической обработки легированных сталей.

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ.

Присутствие в стали легирующих элементов оказывает существенное влияние на превращения, протекающие в ней при нагреве и охлаждении. Поэтому термическая обработка легированной стали имеет ряд важных особенностей.

Первая особенность состоит в том, что температуры нагрева легированных сталей при термической обработке иные, чем углеродистых, содержащих то же количество углерода.

Это объясняется тем, что легирующие элементы смещают в ту или иную сторону критические температуры A_{c1} и A_{c3} которые для углеродистой стали определяются по диаграмме состояния железоуглеродистых сплавов. Большинство легирующих элементов тормозит превращение перлита в аустенит, т. е. повышает критическую температуру A_{c1} . Наиболее сильно повышают A_{c1} титан, молибден, вольфрам, кремний и ванадий. Например, при содержании в стали 8% вольфрама A_{c1} повышается до 1000° , а у стали, содержащей 1% титана, A_{c1} достигает 1100° . Как известно, у углеродистой стали A_{c1} равно 723° . Хром также повышает A_{c1} , но менее интенсивно. Марганец и никель понижают критическую температуру A_{c1} . Аналогичное влияние оказывают легирующие элементы и на критическую температуру A_{c3} . Таким образом, температура нагрева при термической обработке вольфрамистых, хромистых и других сталей должна быть выше температуры, установленной для углеродистых сталей с тем же содержанием углерода, а никелевых и марганцевых,

наоборот, – ниже. При совместном присутствии в стали двух или более легирующих элементов влияние их более сложно и не может быть определено простым сложением или вычитанием воздействия отдельных элементов на критическую температуру. Температуры закалки наиболее часто применяемых конструкционных и инструментальных легированных сталей приведены в табл. 13.

Таблица 13. Температуры закалки конструкционной и инструментальной легированных сталей.

Конструкционные стали		Инструментальные стали	
Марка стали	Температура (в °)	Марка стали	Температура (в °)
30X, 35X, 38XA, 40XP	860	XГC	820 – 860
40X, 40XГP	850	9XC	845 – 865
45X	840	X, XГ	830 – 850
25XГC, 30XГC, 35XГC	880	XBГ	825 – 845
30XM, 40XC	880	XB5	820 – 860
40XH, 30XH3A	820	7X3	850 – 880
40XHMA, 40XHBA, 35XH3B	850	8X3	850 – 880
35ЮA, 38XMЮA	940	9X	820 – 850

Вторая особенность термической обработки легированных сталей состоит в том, что нагрев их должен производиться более медленно, а выдержка при температурах нагрева должна быть более длительной по сравнению с углеродистой сталью. Более медленный нагрев легированных сталей необходим потому, что они проводят тепло хуже, чем углеродистые стали. Так, например, при содержании в стали 1 % кремния теплопроводность ее понижается почти вдвое; 1% хрома – на 35%; 1% марганца – на 30%; 1% никеля – примерно на 20%. Теплопроводность стали 35XM почти в 2 раза хуже, чем стали 35, а сталь 1X13, содержащая 0,1% углерода и 13% хрома, проводит тепло в 4 раза хуже, чем углеродистая сталь марки 10. Это обстоятельство имеет особенно большое значение при термической обработке массивных изделий, так как вследствие низкой теплопроводности стали образуется большая разность температур в различных слоях изделия, что приводит к возникновению значительных внутренних напряжений. Медленный нагрев способствует выравниванию температуры наружных и внутренних слоев, благодаря чему уменьшаются вредные внутренние напряжения.

С этой же целью изделия из легированной стали подвергают ступенчатому нагреву, т. е. нагревают до какой-нибудь промежуточной температуры, чаще всего до 500 – 600°, выдерживают при этой температуре в течение нескольких часов для выравнивания температуры по всему сечению изделий, а затем продолжают дальнейший нагрев до требуемой температуры. Длительная выдержка легированных сталей при температуре нагрева связана с тем, что легирующие элементы усиливают неоднородность аустенита. Поэтому требуется больше времени для того, чтобы успели произойти процессы диффузии, необходимые для получения однородного аустенита. Продолжительность выдержки при температуре нагрева легированной стали должна быть увеличена на 25 – 40% по сравнению с углеродистой сталью. При температурах нагрева, значительно превышающих A_{c3} время выдержки следует ограничивать во избежание роста зерна стали.

При термической обработке легированных сталей много ошибок происходит вследствие недооценки фактора времени в процессе нагрева стали. Для иллюстрации приведем характерные примеры из практики. Была произведена термическая обработка заготовок диаметром 25 мм из стали 35XMA по следующему режиму: заготовки загружались в печь при температуре 850°, выдерживались там 25 мин., затем закачивались в масле и подвергались отпуску при температуре 600°. Механические испытания образцов указанных заготовок после термической обработки показали, что сталь имеет пониженные прочность и пластичность. При повторной термической обработке время выдержки при той же температуре было увеличено до 1 часа 20 мин., а в остальном режим был сохранен без

изменений. В результате повторной обработки образцов ударная вязкость стали повысилась на 65%, а предел прочности – на 17%.

Ошибка противоположного характера была допущена в другом случае. Образцы диаметром 22 мм из стали марки 2Х13 подвергали закалке по такому режиму: их нагревали до температуры 1050°, выдерживали при этой температуре 1 час и охлаждали в масле. После закалки производился отпуск при температуре 650°. Механические испытания образцов после обработки показали, что сталь имеет пониженную ударную вязкость. Это объяснялось тем, что длительная выдержка стали при высокой температуре привела к росту зерна аустенита и образованию крупнозернистой структуры.

При повторной термической обработке режим нагрева был изменен: в течение 1 часа образцы выдерживались при температуре 900°, а затем на несколько минут переносились в среду с температурой 1050°. В результате термической обработки по такому режиму сталь получила нормальную ударную вязкость.

Третья особенность термической обработки легированной стали заключается в том, что охлаждение большинства из них от температур закалки производится в менее интенсивно охлаждающих закалочных средах. Структуру мартенсита у легированных сталей получают при охлаждении их в масле. При содержании в стали значительного количества некоторых легирующих элементов мартенсит получается даже и при охлаждении стали на воздухе.

Эта особенность является следствием того, что все легирующие элементы (за исключением кобальта) в той или иной мере повышают устойчивость аустенита и, следовательно, уменьшают критическую скорость закалки стали. Наибольшее влияние в этом направлении оказывают молибден, марганец, хром и никель, особенно при их совместном присутствии в стали. Сравнение диаграмм изотермического превращения аустенита легированной и углеродистой сталей (рис. 87) показывает, что линия начала изотермического превращения аустенита легированной стали сдвигается вправо. Этот сдвиг тем больше, чем выше степень легированности стали.

Сравнительно высокая устойчивость аустенита легированной стали объясняется тем, что атомы легирующих элементов, располагаясь в кристаллической решетке аустенита, мешают перегруппировке атомов и задерживают превращение аустенита в другие структуры при охлаждении. Возможность получения структуры мартенсита у легированной стали при замедленном ее охлаждении имеет важное практическое значение: уменьшаются внутренние напряжения при закалке, вследствие чего уменьшается опасность коробления изделия и появления на нем трещин. Поэтому изделия сложной формы, где вероятность образования трещин особенно велика, изготовляют из легированной стали.

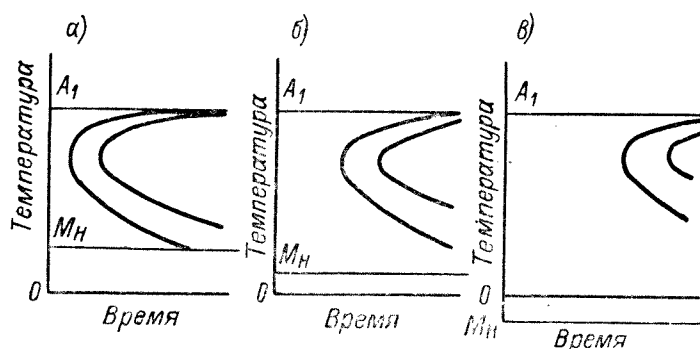


Рис. 87. Диаграммы изотермического превращения легированной и углеродистой сталей:
а – углеродистая; б – малолегированная; в – высоколегированная.

Высокая устойчивость аустенита легированной стали оказывает весьма благоприятное влияние на ее прокаливаемость. Как известно, углеродистая сталь имеет большую критическую скорость закалки, которая даже при охлаждении стали в воде достигается лишь на глубине 5 – 10 мм. Скорость охлаждения более глубоких слоев ниже критической

скорости заковки, и, следовательно, эти слои не прокаливаются. В связи с меньшей критической скоростью заковки легированную сталь можно закалывать на большую глубину, чем углеродистую. У многих изделий, изготовленных из легированной стали, даже при охлаждении их в масле фактическая скорость охлаждения внутренних слоев превышает критическую скорость заковки. Поэтому массивные изделия, которые должны закаливаться насквозь или на большую глубину, следует изготавливать из легированной стали. Наиболее сильно увеличивают прокаливаемость стали хром, никель, молибден и марганец. В сталях, содержащих несколько легирующих элементов, присадка нового элемента сильно увеличивает степень прокаливаемости. Таково влияние никеля при добавке к сталям, содержащим хром; еще эффективнее действует вольфрам при введении его в хромоникелевую сталь. Например, у стали 40X сквозная прокаливаемость достигается в сечениях диаметром до 35 мм, у стали 40ХН – до 75 мм, а у сложнолегированной стали 18ХНВА – до 100 мм. На рис. 88 схематично показана глубина заковки у четырех образцов одинакового сечения, изготовленных из стали различного химического состава.

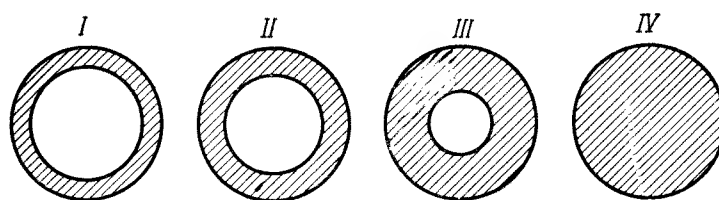


Рис. 88. Влияние легирующих элементов на прокаливаемость стали:
I – углеродистая; II – хромистая; III – хромоникелевая; IV – хромоникельмолибденовая (закаленный слой заштрихован).

Кроме рассмотренных, имеются и другие особенности термической обработки легированных сталей. В частности, для получения структуры сорбита отпуска легированную сталь надо нагревать до более высоких температур, чем нелегированную, и выдерживать при температуре отпуска более длительное время. Это связано с тем, что большинство легирующих элементов замедляет процесс распада мартенсита и задерживает коагуляцию цементита и других карбидов. Ряд легированных сталей необходимо быстро охлаждать после отпуска, чтобы не допустить заметного снижения их ударной вязкости. Специальные режимы применяют при термической обработке высоколегированных сталей, особенно инструментальных. Более подробно один из этих режимов Рассмотрен в следующей главе на примере термической обработки быстрорежущей стали.

ПОРОКИ ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ.

В легированной стали встречаются некоторые пороки, которых нет в углеродистой стали. К ним относятся флокены, отпускная хрупкость, шиферный излом и др.

Флокены (в переводе с немецкого – хлопья) – весьма опасный порок некоторых сортов легированной конструкционной стали, резко снижающий ее механические свойства. Флокены представляют собой тонкие («волосные») трещины длиной в несколько миллиметров. Они располагаются обычно вдоль волокон стали и имеют блестящий мелкокристаллический излом, резко отличающийся по цвету от стального излома. На фоне всего излома они выделяются в виде светлых пятен овальной или круглой формы, напоминающих хлопья (рис. 89). Если из стали, пораженной флокенами, изготовить макрошлиф, то они будут расположены на нем в поперечном сечении и будут наблюдаться в виде мелких трещин. Эти трещины сильно ухудшают механические свойства стали, так как вокруг них сосредоточиваются опасные внутренние напряжения, которые могут привести к разрушению изделия. Не все стали чувствительны к образованию флокенов. Наиболее часто флокены образуются у хромистых, хромоникелевых, хромомарганцовистых, хромоникель-

вольфрамовых и хромоникельмолибденовых сталей.

Флокены появляются обычно в тех случаях, когда подвергнутую горячей обработке давлением (ковка, прокатка) сталь быстро охлаждают до комнатной температуры. Главной причиной появления флокенов считают повышенное содержание в стали водорода, растворившегося при выплавке ее. Способность стали растворять водород сильно уменьшается с понижением температуры. Поэтому при охлаждении стали из твердого раствора выделяется водород, который скапливается в пустотах, имеющихся в стали, и по границам зерен. Эти скопления водорода создают сильные внутренние напряжения, которые приводят к образованию трещин. Наиболее простым и вполне надежным способом предупреждения флокенов является медленное охлаждение стали после горячей обработки давлением. При медленном охлаждении водород успевает выделиться, и флокены не образуются. В литой стали флокены образуются редко, так как она недостаточно плотная, и избыточный водород располагается в многочисленных порах и пустотах. Необходимо отметить, что если флокены уже появились, то их можно устранить повторной горячей обработкой стали давлением на меньшее сечение; флокены при этом свариваются.

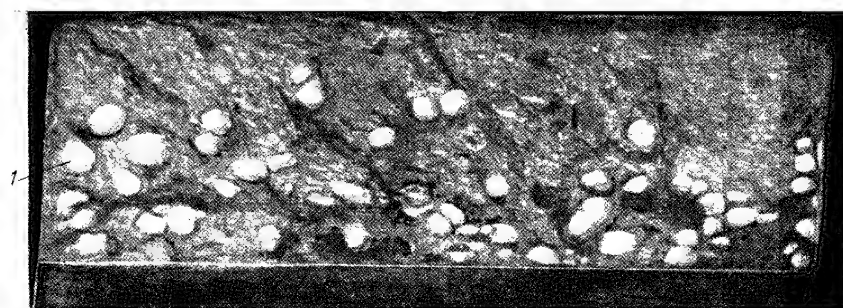


Рис. 89. Флокены (1) в изломе хромоникелевой стали.

Отпускная хрупкость. У многих легированных конструкционных сталей, медленно охлажденных после высокого отпуска ($450 - 600^\circ$), наблюдается резкое понижение ударной вязкости. Это явление называется *отпускной хрупкостью*.

У некоторых сталей, склонных к отпускной хрупкости, ударная вязкость при медленном охлаждении после отпуска снижается в 5 – 10 раз по сравнению с величиной ударной вязкости, получаемой при быстром охлаждении стали после отпуска. Следует отметить, что на остальные характеристики механических свойств стали скорость охлаждения после отпуска не оказывает существенного влияния. Отпускная хрупкость появляется также и в результате длительной выдержки стали при температурах отпуска $400 - 450^\circ$. После продолжительной выдержки стали при указанных температурах скорость охлаждения уже не имеет значения – понижение ударной вязкости наблюдается даже при быстром охлаждении. Особенно склонны к отпускной хрупкости стали, содержащие более 0,8% хрома или более 1% марганца. Такие легирующие элементы, как никель, кремний и ванадий, не вызывают появления отпускной хрупкости стали. Однако они усиливают склонность стали к отпускной хрупкости, если находятся в ней совместно с марганцем или хромом. Фосфор и азот при повышенном их содержании в стали также способствуют развитию отпускной хрупкости. Особенно ярко выраженная склонность к отпускной хрупкости наблюдается у следующих легированных конструкционных сталей: хромистой, марганцовистой, хромоникелевой, хромомарганцовистой, хромокремнистой и хромомарганцовистокремнистой.

Причина резкого понижения ударной вязкости некоторых легированных сталей при медленном охлаждении после высокого отпуска точно еще не выяснена. Ряд исследователей установил, что у некоторых легированных сталей при медленном их охлаждении после высокого отпуска выделяются в измельченном состоянии химические соединения металлов с углеродом, кислородом и азотом (карбиды, оксиды, нитриды и т. д.). Считают, что эти химические соединения, располагающиеся по границам зерен, и являются причиной

отпускной хрупкости стали. Если стали, склонные к отпускной хрупкости, после высокого отпуска охлаждать быстро, то указанные соединения не успеют выделиться, и сталь сохранит высокую ударную вязкость. Следовательно, отпускная хрупкость не является неизбежным пороком стали.

Наиболее простым способом борьбы с отпускной хрупкостью является быстрое охлаждение стали (в масле или в воде) после высокого отпуска. Однако такое охлаждение не всегда желательно, так как создает в стали дополнительные внутренние напряжения, которые могут вызвать коробление изделия. Кроме того, в массивных изделиях не всегда удастся достигнуть быстрого охлаждения внутренних слоев даже и при охлаждении изделия в воде. Склонность стали к отпускной хрупкости можно заметно снизить, а иногда и совсем устранить, добавив к ней при выплавке 0,2 – 0,4% молибдена или 0,6 – 0,8% вольфрама. Конструкционные легированные стали, содержащие молибден или вольфрам, после высокого отпуска можно охлаждать на воздухе, как и углеродистые стали.

Необходимо отметить, что молибден и вольфрам – дефицитные и дорогие металлы, они значительно повышают стоимость стали, поэтому их применяют лишь для изделий ответственного назначения. В настоящее время некоторые исследователи считают, что при определенных условиях выплавки и раскисления стали склонность ее к отпускной хрупкости можно значительно уменьшить и без добавки молибдена или вольфрама. Сталь, имеющую пониженную ударную вязкость вследствие медленного охлаждения после высокого отпуска, можно исправить повторным отпуском. Для этого нужно нагреть сталь снова до температуры отпуска, а затем быстро охладить.

Шиферный излом – это особый вид излома, в котором металл кажется разделенным на отдельные слои. Такой излом по своей форме напоминает излом шифера или сланца; этим и объясняется его название (рис. 90). Шиферный излом встречается лишь в некоторых сортах легированной стали, особенно часто в хромоникелевой. Появление его объясняется главным образом неравномерным распределением в стали серы, фосфора, а также наличием газовых пузырей и пустот, которые вытягиваются при горячей обработке стали давлением в том же направлении, что и волокна. Шиферный излом свидетельствует о низком качестве стали. У стали с шиферным изломом наблюдается весьма значительная разница в механических свойствах образцов, вырезанных вдоль и поперек волокна. Особенно сильно понижается ударная вязкость у поперечных образцов.

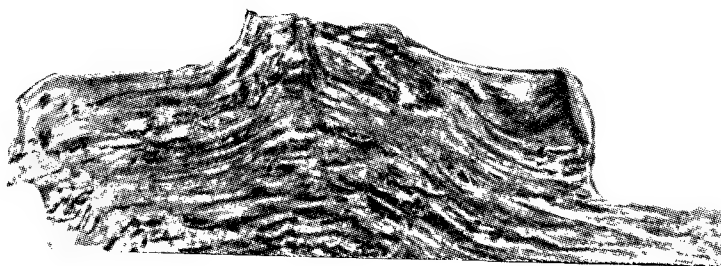


Рис. 90. Шиферный излом кованого стального изделия (в натуральную величину).

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПРУЖИН.

Пружины находят широкое применение в большинстве машин и приборов. Они предназначены для смягчения толчков и ударов, действующих на машину. Чтобы выполнить эту задачу, пружины должны обладать хорошей упругостью. Поэтому основным требованием для пружинных сталей является высокий предел упругости.

Пружины, рессоры и подобные им изделия изготавливают из конструкционной стали с повышенным содержанием углерода (0,5 – 0,7%). Основными легирующими элементами пружинных сталей являются кремний и марганец. Эти элементы дешевы, недефицитны и вместе с тем значительно увеличивают предел упругости стали. Особо ответственные

пружины делают из стали, содержащей хром, ванадий, а иногда вольфрам. Для изготовления пружин наиболее широко используются стали следующих марок: 65, 75, 60, 55С2, 60С2А, 70С3А, 50ХФА. Высокая упругость этих сталей достигается лишь в результате их правильной термической обработки. Термическая обработка пружин состоит из нормализации, закалки и отпуска. Нормализация производится для измельчения зерна стали с целью получения более благоприятной структуры при дальнейшей закалке. Закаливается пружины примерно при следующих температурах:

Марка стали	Температура закалки (в °)
65	840
70	830
75 – 85	820
65Г	830
50С2, 55С2, 60С2, 60С2А	870
55СГ	880
60СГ	860
50ХФА	860

Охлаждающей средой служит масло (и для пружин из углеродистой стали). Пружины из кремнистой стали рекомендуется охлаждать в двух средах: сначала в воде, а затем в масле, учитывая сравнительно малую устойчивость аустенита этой стали в районе температур 500 – 600°. Отпуск пружин производится при температурах 370 – 500° (в зависимости от марки стали и требуемого предела упругости). После закалки и отпуска пружинная сталь имеет структуру троостита или троостита с сорбитом. Термическая обработка пружин является сложной и ответственной операцией. Она требует точного соблюдения режима процесса и правильного выбора нагревательных приборов.

При нагреве для нормализации и закалки необходимо следить за тем, чтобы не произошло изменения формы и размеров пружин в процессе нагрева. Под печи, где нагреваются пружины, должен быть ровным и гладким. Если на поду имеются неровности, то во избежание искривления мелкие пружины следует укладывать на противень, а длинные — на ровные корытообразные швеллеры. Пружины укладывают в горизонтальном (лежащем) положении, так как пружина, поставленная на торец, при нагреве осядет под действием собственного веса и изменит форму. Плоские пружины и рессоры ставят на ребро, а для пружин сложной формы применяют различные приспособления.

Пружины с очень плотной навивкой (без зазоров между витками) необходимо перед посадкой в печь туго обвязывать проволокой по всей длине, чтобы их не развело при нагреве. Так как пружины изготавливают из проволоки сравнительно небольшого сечения, то нагревать их можно быстро. Практически их загружают в печь, нагретую до температуры закалки, и выдерживают там определенное время (из расчета 1 – 2,5 мин. на 1 мм сечения проволоки). Очень важно обеспечить равномерный нагрев пружины, так как недогрев может привести к неполной закалке и понижению ее упругих свойств. Небольшие пружины желательно нагревать в соляных ваннах. Пружины средних и крупных размеров нагревают в электропечах, предпочтительнее в электропечах типов Н-45 и Н-75. Преимущество этих печей состоит в том, что в них можно вводить через трубку азот, чтобы уменьшить обезуглероживание стали. При термической обработке пружин, изготовленных из кремнистой стали, следует иметь в виду, что эта сталь очень склонна к обезуглероживанию. Поэтому выдержка пружин при температурах нагрева должна быть минимальной (из расчета примерно 1 мин. на 1 мм сечения проволоки). Излишнее пребывание этих пружин в печи может привести к значительному понижению их упругих свойств вследствие уменьшения углерода в поверхностном слое.

Для предупреждения обезуглероживания стали на под печи, где нагреваются пружины, рекомендуется насыпать немного древесного угля в смеси с небольшим количеством соды (около 10%) или бывший в употреблении карбюризатор. В этом случае в печи не будет окислительной атмосферы. При термической обработке пружин, изготовленных из

марганцовистой стали, следует помнить, что эта сталь склонна к перегреву. Поэтому необходимо очень внимательно следить за температурой печи.

Для охлаждения пружин обычно применяют циркулирующее масло температурой не выше 40 – 60°. При закалке не рекомендуется держать пружины в охлаждающей среде до полного остывания, а лучше извлечь их из нее в тот момент, когда пружины имеют температуру 100 – 150°. Определить температуру закаливаемой пружины можно сравнительно просто. Необходимо периодически вынимать ее из масла и наблюдать за состоянием его. Если масло, приставшее к поверхности пружины, при соприкосновении с воздухом дымит, значит охлаждение можно закончить, если же оно вспыхивает – значит температура 100 – 150° еще не достигнута.

Сразу же после закалки пружины рекомендуется подвергать отпуску. Во избежание искривления длинные пружины перед отпуском надеваются на трубки из толстого листового железа. Перед отпуском необходимо удалить масло с поверхности пружин. Для этого их промывают в течение 10 мин. в нагретом до 40 – 60° содовом растворе и сушат в опилках. Если масло с пружин не удалено, оно сгорит при отпуске, что может привести к повышению температуры отпуска и понижению упругих свойств отдельных пружин. Для получения однородной структуры и одинаковой твердости металла по всей длине пружины отпуск лучше производить в селитровых или свинцовых ваннах; можно использовать также и электропечи типа ПН-31/31 с вентилятором. На практике наблюдались случаи, когда пружины, отпущенные в камерных печах, ломались при работе ввиду неодинаковой твердости в различных точках. Продолжительность отпуска устанавливается из расчета 1,5 мин. на 1 мм диаметра проволоки, но не менее 30 мин. Твердость пружин после закалки и отпуска должна составлять $H_{RC} \approx 40 - 47$. Необходимо иметь в виду, что на самой пружине точно определить твердость весьма затруднительно. Поэтому при обработке партии пружин к одной из них привязывают кусок проволоки, из которой изготовлена пружина. По твердости этого куса и судят о твердости пружины. У пружин, работающих на удар, после термической обработки производят дополнительный отпуск крайних нерабочих витков, которые служат опорными поверхностями. Отпуск преследует цель уменьшить твердость этих витков во избежание их поломки. Такой отпуск производят в свинцовых или соляных ваннах. При этом крайние витки необходимо тщательно изолировать от соседних с помощью асбеста. Выше был рассмотрен процесс термической обработки пружин, изготовленных из отожженной проволоки.

На машиностроительные заводы часто поступают пружины, изготовленные из холодноотянутой проволоки, которую называют патентированной проволокой. Эта проволока в процессе ее производства на металлургическом заводе подвергается закалке в свинцовой ванне. Такая операция термической обработки называется патентированием. Иногда такую проволоку называют еще рояльной.

Патентированная проволока изготавливается из углеродистой стали. Согласно ГОСТ 1546 – 53, она имеет следующие обозначения: ВС – проволока высокого сопротивления и ОВС – проволока особо высокого сопротивления. Указанные обозначения характеризуют качество проволоки, а не марку стали. Патентированная проволока изготавливается обычно диаметром до 6 мм и применяется для небольших пружин. Она имеет очень высокую упругость и хорошую вязкость и не нуждается в термической обработке. Пружины, изготовленные из патентированной проволоки, подвергаются только отпуску при температурах 200 – 275° для снятия внутренних напряжений, полученных при навивке пружины. Отпуск обычно производится в масляных или соляных ваннах либо в отпускных электрических печах типа ПН-31/31 с вентилятором. На работоспособность пружины большое влияние оказывает состояние ее поверхности. Трещины, плены и другие дефекты поверхности приводят к преждевременному разрушению пружины. Вредное действие указанных дефектов можно значительно уменьшить путем наклепа поверхности пружины. В настоящее время для этой цели широко применяют обработку поверхности некоторых пружин и рессор дробью.

Глава XII.

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ.

ХАРАКТЕРИСТИКА БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ.

Быстрорежущая сталь отличается от всех других инструментальных сталей тем, что изготовленный из нее инструмент может работать при больших скоростях резания, не теряя своей твердости. В процессе резания происходит разогрев режущей части инструмента. Чем производительнее работает инструмент, тем выше температура разогрева режущей кромки инструмента. Углеродистые, а также большинство легированных инструментальных сталей не могут быть использованы для инструментов, работающих при больших скоростях резания. Это объясняется тем, что при температурах 250 – 300° указанные стали начинают терять свою высокую твердость вследствие изменения структуры – перехода мартенсита в троостит. Замечательным свойством быстрорежущей стали является ее высокая красностойкость, т. е. способность сохранять высокую твердость и режущую способность при нагреве до 550 – 600°. Это свойство выделяет быстрорежущую сталь из числа всех других инструментальных сталей.

Быстрорежущая сталь была изобретена в 1900 г. Ее появление сыграло огромную роль в развитии машиностроения: появились новые мощные быстроходные станки и автоматы, резко поднялась производительность механических цехов. Красностойкость быстрорежущей стали определяется в основном двумя факторами: химическим составом стали и ее термической обработкой. Быстрорежущая сталь имеет сложный химический состав. В табл. 14 приведен химический состав быстро, режущей стали марок P18 и P9. Цифра в марке указывает примерное содержание в стали вольфрама (в процентах).

Таблица 14. Химический состав быстрорежущей стали.

Марка стали	Содержание элементов (в %)			
	углерод	вольфрам	ванадий	хром
P18	0,70 – 0,80	17,5 – 19,0	1 – 1,4	3,8 – 4,4
P9	0,85 – 0,95	8,5 – 10,0	2 – 2,6	3,8 – 4,4

Наиболее важным легирующим элементом быстрорежущей стали является вольфрам, который почти целиком находится в виде карбидов, обеспечивающих красностойкость стали. Значение хрома состоит в том, что он сильно понижает критическую скорость закалки стали. При содержании в быстрорежущей стали около 4% хрома она становится самозакаливающейся, т. е. закаливается даже при охлаждении на воздухе. Чтобы придать быстрорежущей стали высокие режущие свойства, ее подвергают термической обработке по специальному режиму, который значительно отличается от режима термической обработки инструментальных сталей.

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ.

Отжиг. При тепловой обработке быстрорежущей стали следует всегда иметь в виду две важные ее особенности: низкую теплопроводность и самозакаливаемость. Из-за указанных свойств быстрорежущая сталь после прокатки иковки может иметь неблагоприятную структуру и свойства, в частности повышенную твердость и значительные внутренние напряжения. Поэтому заготовки из быстрорежущей стали после горячей механической обработки непременно подвергают предварительной термической обработке – отжигу. Целью отжига быстрорежущей стали являются: снятие вредных внутренних напряжений, возникших в процессековки; улучшение обрабатываемости стали на станках; подготовка структуры стали для последующей закалки. Отжиг быстрорежущей стали производится при температурах 850 – 900°. Следует избегать излишне высокой температуры отжига и

длительной выдержки стали при температуре отжига, так как при этом в аустените растворяется повышенное количество карбидов, распад аустенита при охлаждении задерживается, и сталь получает повышенную твердость. Ввиду низкой теплопроводности быстрорежущей стали нагрев ее должен производиться медленно и равномерно. Заготовки рекомендуется загружать в нагретую до температуры $200 - 300^\circ$ печь и дальнейший нагрев до температуры отжига осуществлять со скоростью $150 - 200^\circ$ в час. Охлаждать заготовки после отжига следует также медленно. До температуры 650° их охлаждают в замазанной печи с закрытыми шиберами, а дальнейшее охлаждение до комнатной температуры можно производить и на воздухе. Для предохранения стали от обезуглероживания заготовки иногда отжигают в плотно закрытых ящиках, наполненных какой-либо нейтральной средой (чистая чугунная стружка, чистая зола и т. п.). На машиностроительных заводах при небольшом количестве заготовок применяют изотермический отжиг по следующему режиму. Заготовки нагревают до температуры $880 - 900^\circ$, выдерживают при этой температуре непродолжительное время, затем охлаждают до температуры $720 - 730^\circ$ или переносят в другую печь, имеющую такую температуру, и выдерживают при указанной температуре 2 – 3 часа (до полного распада аустенита в феррито – цементитную смесь). Окончательное охлаждение заготовок можно производить на воздухе. Однако во избежание излишних внутренних напряжений до температуры $400 - 450^\circ$ лучше охлаждать их с печью, а затем уже на воздухе. Процесс изотермического отжига протекает значительно быстрее, чем обычный отжиг. После отжига структура быстрорежущей стали состоит из сорбита и карбидов. Твердость ее составляет $H_B = 217 - 241$. Отожженные заготовки затем подвергаются механической обработке, при этом по режущим кромкам и посадочным местам оставляются припуски на шлифовку. Изготовленный инструмент подвергают окончательной термической обработке — закалке и отпуску.

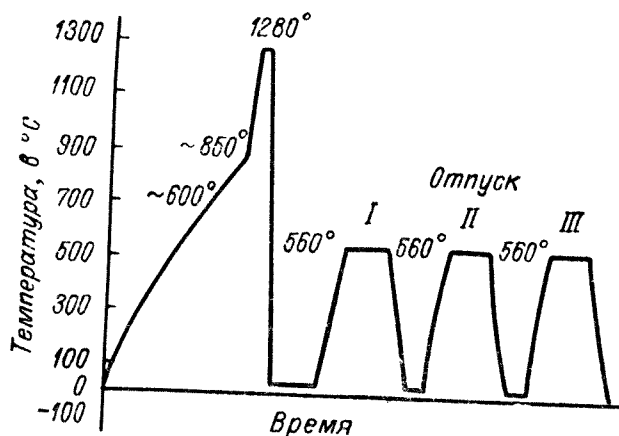


Рис. 91. Схема термической обработки быстрорежущей стали.

Закалка. Инструменты из быстрорежущей стали закаливаются при очень высоких температурах: из стали марки P18 — при $1270 - 1310^\circ$, а из стали марки P9 — при $1220 - 1240^\circ$. После закалки изделия подвергаются многократному отпуску при температурах $550 - 560^\circ$. Схема термической обработки быстрорежущей стали представлена на рис. 91. Прежде всего выясним, чем вызывается столь высокая температура нагрева быстрорежущей стали при закалке? Ведь она превышает критическую температуру A_{c1} на $400 - 450^\circ$, в то время как у большинстве инструментальных сталей она составляет $A_{c1} + 40 \pm 50^\circ$. Высокая температура нагрева нужна для того, чтобы растворить в аустените как можно больше карбидов и получить таким путем высоколегированный аустенит. При охлаждении такого аустенита получится высоколегированный мартенсит, содержащий значительное количество вольфрама, а также ванадия и хром. Такой мартенсит не претерпевает распада при нагреве до температуры 600° . Это и обуславливает красностойкость быстрорежущей стали.

Необходимо отметить, что даже при максимальной температуре нагрева (1300°) полного растворения карбидов в аустените не происходит, что видно из диаграммы на рис. 92. Если быстрорежущую сталь нагреть при закалке до температур $850 - 900^{\circ}$ или даже 1100° , то она будет достаточно твердой, но не будет обладать свойством красностойкости.

Таким образом, для получения высокой красностойкости быстрорежущей стали температура ее закалки должна быть как можно выше. Однако существует определенная граница температур, выше которых нагревать быстрорежущую сталь становится опасным, так как начинаются интенсивный рост зерна и оплавление стали. Такой границей для стали P18 является температура 1310° , а для стали P9 — температура 1240° . Оптимальная температура закалки инструментов из быстрорежущей стали выбирается в зависимости от марки стали, а также формы и размеров инструмента. При закалке резцов из стали P18, которые в дальнейшем подвергаются заточке, оплавление кромок не представляет большой опасности. Поэтому такие инструменты можно нагревать при термической обработке до температур $1300 - 1310^{\circ}$. При закалке фасонных резцов, фрез и сверл из этой же стали нагрев производят до температур $1260 - 1280^{\circ}$, так как оплавление кромок здесь недопустимо. Красностойкость инструмента в этом случае будет несколько ниже.

Инструменты из стали марки P9 нагреваются при закалке до температуры на $40 - 50^{\circ}$ ниже, чем инструменты из стали P18.

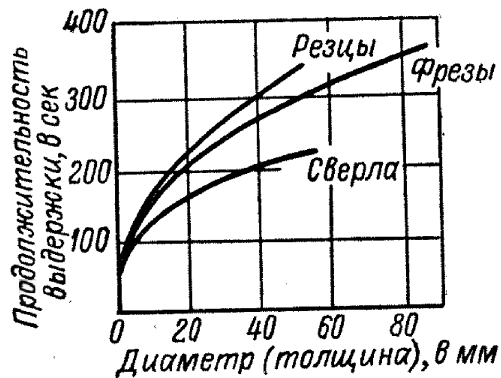


Рис. 93. Диаграмма для определения времени выдержки инструмента из быстрорежущей стали при температуре закалки.

инструменты нагревают до температуры 850° в обычной камерной печи, электрической или пламенной.

Второй (окончательный) нагрев изделия до температуры закалки производят в соляной ванне — расплавленном хлористом бarii. Быстрый нагрев в этой ванне необходим потому, что при высоких температурах появляется опасность обезуглероживания стали. Для уменьшения обезуглероживания ванна должна быть хорошо раскислена. С этой целью в нее добавляют ферросилиций (раскисление производится кремнием). Фасонные инструменты, которые не подвергаются в дальнейшем шлифованию, перед загрузкой в ванну следует покрыть слоем

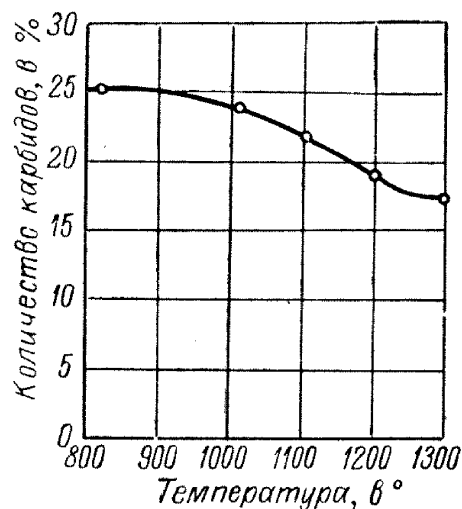


Рис. 92. Количество нерастворившихся карбидов в стали P18 в зависимости от температуры закалки.

Режущие свойства инструмента из быстрорежущей стали зависят также от метода нагрева при закалке. Ввиду низкой теплопроводности быстрорежущей стали ее нагревают постепенно — в два, а иногда и в три приема. Сначала инструмент медленно нагревают до температур $820 - 850^{\circ}$, а затем переносят в другое нагревательное устройство, где быстро нагревают до температуры закалки. На ряде заводов распространен двойной нагрев инструмента до температуры 850° с промежуточной выдержкой при температурах $620 - 650^{\circ}$, что обеспечивает более равномерный нагрев и уменьшает опасность появления вредных внутренних напряжений. Мелкие инструменты нагревают до температуры 850° в соляной ванне, состоящей из 78% хлористого бария и 22% хлористого натрия. Массивные

буры. Необходимо помнить, что обезуглероживание – это опасный дефект, который может привести к браку уже готового инструмента. Большое влияние на свойства инструмента из быстрорежущей стали оказывает также продолжительность выдержки его при закалочной температуре. Чрезмерно длительная выдержка способствует появлению в стали крупнокристаллического излома и хрупкости. Недостаточная выдержка может привести к понижению красностойкости стали, так как в твердый раствор перейдет меньшее количество карбидов вольфрама. Чем выше температура закалки, тем меньше должна быть выдержка. При первом подогреве изделия (до температур 320 – 850°) в соляной ванне выдержка определяется из расчета 15 – 20 сек. на 1 мм толщины инструмента. Продолжительность выдержки при температуре закалки можно определять по диаграмме, представленной на рис. 93. Обычно дают выдержку из расчета 6 – 7 сек. на каждый миллиметр сечения инструмента. Контроль за нагревом осуществляется следующим образом. Инструмент приподнимается над зеркалом ванны на 1 – 2 сек. и осматривается. Нагрев можно считать законченным, если инструмент имеет цвет соли, т. е. станет слабо заметным на зеркале ванны. Необходимо иметь в виду, что увеличение времени выдержки оказывает такое же влияние на свойства инструмента, как и повышение температуры закалки.

Охлаждение при закалке может производиться различными способами. Наиболее широко применяется охлаждение в масле. Для уменьшения опасности появления закалочных трещин перед погружением инструмента в масло рекомендуется произвести его подстуживание до температур 900 – 1000°. Обычно инструмент охлаждают в масле до температур 150 – 200°, а затем – на спокойном воздухе. Температуру инструмента при извлечении его из масла можно определить по внешним признакам: если масло на поверхности инструмента слегка дымится, значит он имеет температуру 200°; если же масло дымится сильно, это значит, что температура инструмента превышает 200° и его нужно снова погрузить в масло. Необходимую твердость и красностойкость инструмента из быстрорежущей стали можно получить и при охлаждении его на воздухе. Однако, как показывает практика, режущие свойства инструмента в этом случае хуже, чем при закалке в масле. Хорошие результаты в смысле уменьшения деформации инструмента дает ступенчатая закалка. При этом способе обработки изделия охлаждают в течение 10 – 20 мин. в селитровой ванне, нагретой до температур 450 – 550°, и затем окончательно охлаждают в масле или на спокойном воздухе. Этот способ применяют для инструментов небольших сечений, а также сложной формы. На рижском заводе «Автоэлектроприбор» резцы и дисковые фрезы из стали Р18 подвергались термической обработке по следующему режиму: нагревались до температуры 1270°, охлаждались 10 – 15 мин. в селитровой ванне при температуре 530° и затем на воздухе после закалки применялся двукратный отпуск. В результате указанной обработки твердость инструмента составляла $H_R = 62 - 66$. Как резцы, так и дисковые фрезы показали большую стойкость в работе.

Применяется также изотермическая закалка инструментов из быстрорежущей стали. При этом изделия охлаждаются в течение 20 – 60 мин. в соляной ванне температурой 200 – 300° и затем на воздухе. После закалки структура быстрорежущей стали содержит около 50% легированного мартенсита, 30 – 40% легированного остаточного аустенита и некоторое количество карбидов, которые при нагреве не перешли в аустенит. Твердость быстрорежущей стали после правильной закалки должна быть $H_R = 60 - 63$. Более высокая твердость чаще всего является результатом недогрева инструмента при закалке. Для проверки этого инструмент подвергают дополнительному отпуску при температуре 560°. Если действительно имел место недогрев, то твердость инструмента после отпуска значительно снизится.

Отпуск. После закалки быстрорежущая сталь должна обязательно подвергаться отпуску. Инструменты из быстрорежущей стали отпускаются при температурах 550 – 560°, причем отпуск при указанных температурах производится многократно (несколько раз) с выдержкой по 1 часу. Схема трехкратного отпуска быстрорежущей стали была приведена на рис. 91. Чем объяснить столь необычный и сложный режим отпуска быстрорежущей стали? Это

объясняется тем, что в структуре закаленной быстрорежущей стали содержится 30 – 40% остаточного аустенита. Основной целью отпуска является превращение этого аустенита в мартенсит. Так как аустенит быстрорежущей стали очень устойчив, то требуется повторить отпуск несколько раз, чтобы большая часть остаточного аустенита перешла в мартенсит. При отпуске в быстрорежущей стали в основном протекают два процесса. Первый происходит при нагревании и выдержке при температуре отпуска и заключается в выделении из остаточного аустенита карбидов в измельченном состоянии. Вследствие этого аустенит становится менее легированным. Это облегчает превращение его в мартенсит. Второй процесс происходит при охлаждении стали – в области температур 200 – 100° аустенит превращается в мартенсит. В процессе отпуска происходит также снятие внутренних напряжений, возникших в быстрорежущей стали при закалке. В последнее время на некоторых заводах применяют ускоренный отпуск быстрорежущей стали за счет некоторого повышения температуры отпуска. Так, на заводе им. Воскова инструмент из стали марки Р9 подвергают трехкратному отпуску при температуре 590° с выдержкой по 15 мин. Ранее применялся отпуск при температуре 560° с выдержкой по 1 часу. Отпуск инструмента из быстрорежущей стали производят либо в соляных ваннах, либо в шахтных печах с принудительной циркуляцией воздуха. После отпуска структура быстрорежущей стали состоит из мелкоигльчатого мартенсита и карбидов. Твердость инструмента после отпуска составляет $H_R = 62 - 65$.

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ.

Обработка холодом. Превращение остаточного аустенита закаленной быстрорежущей стали в мартенсит достигается также путем ее охлаждения до низких температур – 80± – 100°.

Такая обработка называется обработкой холодом. Наличие в закаленной быстрорежущей стали большого количества остаточного аустенита объясняется тем, что температура конца мартенситного превращения (M_k) быстрорежущей стали равна примерно – 100°, а при закалке охлаждение инструмента производится лишь до комнатной температуры. При обработке холодом достигается температура конца мартенситного превращения.

Обработка стали при низких температурах осуществляется в специальных сосудах с хорошей тепловой изоляцией. Необходимую температуру получают с помощью сухого льда (твердая углекислота), жидкого кислорода или жидкого воздуха. Сухой лед со спиртом или ацетоном дает температуру – 70°, жидкий кислород – 183°. Обработка стали холодом должна производиться сразу же после ее закалки, в противном случае увеличивается устойчивость аустенита и его труднее будет превратить в мартенсит. После обработки холодом производят отпуск стали при температурах 550 – 560° только один раз. Таким образом, обработка холодом заменяет многократный отпуск.

Цианирование. Для повышения стойкости некоторые инструменты из быстрорежущей стали после окончательной термической и механической обработки подвергаются низкотемпературному цианированию в жидких ваннах или в газовой среде (см. стр. 177). Температура цианирования должна быть на 10 – 15° ниже температуры отпуска. При более высокой температуре в стали может произойти частичное образование троостита, и готовый инструмент будет испорчен. Практически цианирование осуществляют при температурах 540 – 550°, а особо точного инструмента – при 520 – 530°. Глубина цианированного слоя составляет обычно 0,02 – 0,04 мм. Продолжительность выдержки инструмента при температуре цианирования зависит от вида инструмента и его размеров. Мелкий инструмент при жидком цианировании выдерживают в ванне 20 – 30 мин., более крупный – 40 – 50 мин. При газовом цианировании продолжительность выдержки значительно больше – колеблется в пределах от 45 до 120 мин. Чрезмерно большая выдержка способствует получению более толстого и хрупкого слоя, который легко отслаивается. После цианирования инструмент охлаждается на воздухе или в песке. После жидкостного цианирования инструмент

нейтрализуют и промывают. Для более равномерного остывания инструмент лучше охлаждать в подвешенном состоянии. В результате цианирования твердость инструмента, повышается до $H_{RC} = 67 - 70$. Следует иметь в виду, что инструменты, изготовленные из других инструментальных сталей, не могут подвергаться цианированию, так как температура отпуска у них значительно ниже температуры цианирования. Следовательно, при температуре цианирования эти стали потеряют свою твердость.

Обработка паром. Повышения стойкости инструмента из быстрорежущей стали можно достигнуть также путем его обработки в атмосфере водяного пара. Обработка паром осуществляется в герметических печах. Готовый инструмент, тщательно промытый и просушенный (обезжиренный), загружается в печь и выдерживается 40 – 60 мин. при температурах 350 – 370°. После этого в печь подается пар, и температура в печи поднимается до 560°. При указанной температуре инструмент выдерживается 30 мин. (при непрерывной подаче пара). Затем инструмент охлаждается в подогретом масле. Инструмент, обработанный паром, покрывается плотной пленкой темно – синего цвета толщиной около 3 микрон, эта пленка представляет собой магнитную окись железа (Fe_3O_4). В результате обработки паром повышаются режущие свойства инструмента, кроме того, улучшается его сопротивление коррозии.

ДЕФЕКТЫ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ.

Нафталиновый излом. Иногда после закалки быстрорежущая сталь имеет не обычный матовый фарфоро – видный излом, а крупнозернистый, чешуйчатый, со светлыми блестками, напоминающими чешуйки нафталина. Такой излом называется *нафталиновым*. Инструмент, имеющий такой излом, отличается значительной хрупкостью, легко ломается и выкрашивается. Чаще всего нафталиновый излом получается при повторной закалке быстрорежущей стали без промежуточного отжига. Поэтому, если необходима повторная закалка инструмента из быстрорежущей стали, его предварительно надо подвергнуть отжигу. Следует иметь в виду, что уже возникший нафталиновый излом устранить очень трудно. Даже при двух – и трехкратном отжиге стали указанный порок полностью не устраняется.

Карбидная ликвация. Этот дефект встречается в быстрорежущей стали и в некоторых других легированных инструментальных сталях. Сущность его состоит в том, что карбиды располагаются в структуре стали неравномерно – в виде скоплений на отдельных участках. Этот дефект получается в результате плохой прокованности стали. Карбидная ликвация вызывает неравномерную твердость инструмента и резко снижает прочность его режущих кромок. Если скопления карбидов оказываются на режущей грани инструмента, то в процессе работы происходит ее выкрашивание. При наличии карбидной ликвации заготовки следует направить на дополнительную обработку давлением. Чем выше степень прокованности быстрорежущей стали, тем равномернее распределение карбидов и тем выше режущие свойства стали.

Глава XIII.

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЧУГУНА.

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СЕРОГО ЧУГУНА.

Наибольшее применение в машиностроении имеют отливки из серого чугуна. Такое название чугун получил по виду излома, который имеет серый цвет из-за наличия в структуре свободного углерода в форме графита. Как известно, в белых чугунах графита нет – весь углерод там находится в виде цементита. Структура белого чугуна подробно рассмотрена в гл. IV. В структуре серого чугуна следует различать металлическую основу и графитовые включения. По виду металлической основы различаются серые чугуны перлитные, перлитно – ферритные и ферритные. Микроструктуру серых чугунов приведены на рис. 94.

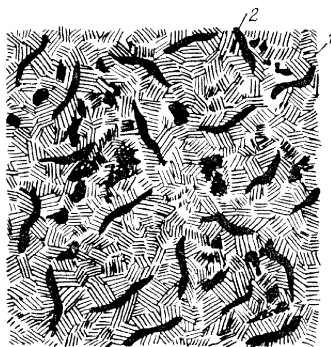


Рис. 95. Модифицированный чугун ($\times 300$): 1 — перлит; 2 — графит.



a



б



в

Рис. 94. Микроструктура серых чугунов ($\times 250$):
a — перлит+графит; *б* — феррит+перлит+графит; *в* — феррит+графит.

Металлическая основа серых чугунов соответствует структуре стали, но свойства стали определяются только металлической структурой, а свойства серого чугуна зависят также и от количества графитовых включений их формы и размеров. У обычных серых чугунов графит имеет форму пластинок или чешуек темно – серого цвета (см. рис. 94). Графит обладает низкими механическими свойствами, он нарушает сплошность металлической основы и действует как надрез или мелкая трещина. Располагаясь между зернами металлической основы, графит ослабляет связь между ними. Поэтому серый чугун плохо сопротивляется растяжению и имеет очень низкие значения пластичности и вязкости. Чем крупнее и прямолинейнее форма графитовых включений, тем хуже механические свойства серого чугуна. Твердость серого чугуна, а также его сопротивление сжатию близки к свойствам стали, имеющей такую же структуру, как металлическая основа чугуна. Серые чугуны маркируются в зависимости от их механических свойств: СЧ12-18, СЧ24-44 и др. (ГОСТ 1412 – 54). Первые две цифры марки указывают предел прочности на разрыв в килограммах на квадратный миллиметр, а последние две цифры – предел прочности на изгиб в тех же единицах. Механические свойства серого чугуна можно несколько улучшить, если получить в отливках равномерно распределенный мелкопластинчатый графит. Это достигается путем специальной обработки чугуна, которая называется *модифицированием*. Сущность этой обработки состоит в том, что в жидкий чугун перед его разливкой в формы вводят небольшое количество силикокальция или ферросилиция (кремний в соединении с кальцием или железом). Эти добавки образуют дополнительные центры графитизации, в результате чего получается мелкопластинчатый графит. Чугун с таким графитом называется модифицированным. Он отличается более высоким сопротивлением разрыву, чем обычный серый чугун, но пластичность и вязкость его не улучшаются. Микроструктура модифицированного чугуна приведена на рис. 95. В последние годы в промышленность внедрен высокопрочный чугун, у которого графит имеет шаровидную форму.

Высокопрочный чугун получается путем добавки в жидкий чугун незадолго перед его разливкой небольшого количества магния, а затем ферросилиция (сплав кремния с железом). Иногда модифицирование магнием и ферросилицием осуществляют одновременно. В результате такого двойного модифицирования образуется графит округленной формы. Металлическая основа высокопрочного чугуна состоит из феррита и перлита или из одного перлита. Микроструктура высокопрочного чугуна представлена на рис. 96. Высокопрочный чугун является новым конструкционным материалом, в котором сочетаются ценные свойства стали и чугуна. Он обладает сравнительно высокой прочностью при достаточной пластичности и вязкости. В 1954 г. впервые появился стандарт на высокопрочный чугун – ГОСТ 7293 – 54. В этом ГОСТе имеется ряд марок высокопрочного чугуна: ВЧ60 – 2, ВЧ40 – 10 и др. Принцип маркировки здесь несколько иной, чем у серых чугунов: первые две цифры указывают предел прочности на разрыв в килограммах на квадратный миллиметр, а последние цифры — относительное удлинение в процентах. Ударная вязкость высокопрочного чугуна находится в пределах 2 – 4 кгм/см² на ненадрезанных образцах. Высокопрочный чугун в ряде случаев с успехом заменяет стальное литье, что дает большой экономический эффект. Механические свойства рассмотренных чугунов можно заметно улучшить при помощи термической обработки.



Рис. 96. Микроструктура высокопрочного чугуна (×300):
а – до термической обработки; б – после термической обработки.

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ОТЛИВОК ИЗ СЕРОГО ЧУГУНА.

Для улучшения свойств отливок из серого чугуна применяются следующие виды термической обработки:

- 1) отжиг для снятия литейных напряжений;
- 2) отжиг для уменьшения твердости;
- 3) нормализация и закалка для повышения прочности и сопротивления износу.

При термической обработке отливок из серого чугуна следует иметь в виду, что при затвердевании в них образуются значительные внутренние напряжения, которые обычно называют литейными напряжениями. Кроме того, наличие в чугуне включений графита способствует образованию трещин. Для предупреждения появления трещин отливки следует нагревать осторожно, особенно если они имеют сложную форму. Такие отливки рекомендуется загружать в холодную печь, а затем медленно нагревать вместе с печью. Изменение свойств серого чугуна при термической обработке достигается лишь за счет воздействия на металлическую основу, а форма и расположение графита существенно не изменяются. Термическая обработка серых чугунов, преследующая цель изменить структуру металлической основы, является более трудной операцией, чем термическая обработка стали. Это объясняется тем, что чугун содержит больше посторонних примесей (кремний, марганец и др.), чем сталь. Лучшие результаты получаются при термической обработке чугунов, имеющих перлитную структуру, что достигается ограничением содержания в чугуне кремния. Серые чугуны, содержащие кремния более 2,7 – 3,0%, термической

обработке подвергать нецелесообразно, потому что у них не удастся заметно изменить структуру металлической основы.

Отжиг для снятия литейных напряжений. Как уже говорилось, при затвердевании отливок в них образуются значительные внутренние напряжения, которые могут привести к понижению прочности отливок. Устранение этих напряжений после механической обработки отливок может вызвать изменение формы и размеров изделия (например, круглые поршни могут стать овальными, направляющие станков теряют свою прямолинейность). Для снятия литейных напряжений применяется естественное старение или низкотемпературный отжиг. Естественное старение заключается в том, что отливки освобождаются от внутренних напряжений под действием климатических факторов. Для этого отливки выдерживают от 6 месяцев до 2 лет на заводских дворах. Этот способ в настоящее время применяется редко, так как значительно удлиняет производственный цикл. Более полное снятие остаточных литейных напряжений в отливках достигается при низкотемпературном отжиге. Для этого отливку укладывают в холодную или нагретую до температур $100 - 200^\circ$ печь, а затем вместе с печью медленно (со скоростью от 50 до 150° в час) нагревают до температур $500 - 550^\circ$. При указанных температурах отливки выдерживаются от 2 до 10 час. в зависимости от их формы и размеров. Ориентировочно время выдержки устанавливают из расчета $1,5 - 2$ часа на 25 мм толщины стенки отливки. После выдержки отливку медленно (со скоростью $20 - 30^\circ$ в час) охлаждают до температуры 250° . Дальнейшее охлаждение до комнатной температуры может производиться на воздухе. Так как температура отжига невысокая, то существенных изменений в структуре чугуна не происходит и твердость его не снижается.

Отжиг для уменьшения твердости. Наиболее часто такому отжигу подвергают отливки, имеющие вследствие быстрого охлаждения отбеленную поверхность. Отбеленный слой представляет собой белый чугун большой твердости. Механическая обработка таких отливок. Чтобы понизить твердость чугуна и улучшить его обрабатываемость на станках, необходимо добиться разложения цементита (Fe_3C) на его составные части: железо и графит, т. е. необходимо превратить белый чугун в серый. Это достигается при помощи отжига, который осуществляется следующим образом. Отливки загружают в печь и нагревают до температур $850 - 870^\circ$. При этих температурах они выдерживаются от $0,5$ до 5 час, в зависимости от толщины стенок отливки и химического состава чугуна. Более массивные отливки нагревают до температуры 950° . Охлаждение после отжига в большинстве случаев может производиться на воздухе. На некоторых заводах применяют более прогрессивные методы отжига: отливки нагревают до температур $1100 - 1150^\circ$ в хлористо-бариевых соляных ваннах или токами высокой частоты и выдерживают при этих температурах в первом случае $1 - 5$ мин. и во втором — $3 - 5$ сек.

Термическая обработка для повышения твердости и прочности чугуна. В зависимости от предъявляемых требований повышение твердости и прочности чугуна может быть достигнуто с помощью нормализации или закалки с последующим отпуском. Нормализация применяется в тех случаях, когда необходимо иметь чугун твердостью $H_B = 200 - 220$, т. е. в металлической основе получить структуру перлита. Процесс нормализации состоит в нагреве отливок до температур $870 - 920^\circ$, выдержке их при этих температурах в течение $1 - 3$ час. И последующем охлаждении на воздухе, а массивных отливок — в струе воздуха. При нагреве чугуна происходит насыщение аустенита углеродом за счет графита, а при последующем охлаждении в структуре чугуна увеличивается количество перлита. Отливки сложной формы после нормализации иногда подвергают отпуску при температурах $400 - 500^\circ$ для снятия внутренних напряжений, полученных при охлаждении чугуна на воздухе. Закалка и отпуск отливок серого чугуна осуществляются в тех случаях, когда необходимо иметь твердость $H_B = 300 - 500$, т. е. получить в металлической основе сорбит или троостит. Закалка производится от температур $850 - 950^\circ$ чаще всего в масле во избежание появления трещин. После закалки осуществляется отпуск при температурах $300 - 500^\circ$, в зависимости от требуемой твердости отливок. Необходимо отметить, что отливки из серого чугуна редко подвергаются закалке и отпуску. Объясняется это тем, что в чугуне содержится

малопрочный и рыхлый графит, который сильно снижает эффективность закалки. Наиболее эффективна изотермическая закалка отливок модифицированного чугуна. Для отливок с толщиной стенок 12 – 15 мм, имеющих перлитную металлическую основу, может быть рекомендован следующий режим закалки: нагрев до 870 – 920°; выдержка при этих температурах 20 – 30 мин.; перенос в соляную ванну температурой 280 – 350°; выдержка в ней в течение 15 – 20 мин.; окончательное охлаждение на воздухе. В результате изотермической закалки прочность отливок повышается на 50 – 70%, а сопротивление износу – в 2 – 3 раза.

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ОТЛИВОК ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА.

Термическая обработка высокопрочного чугуна является более эффективной, чем чугуна с пластинчатым графитом, так как графит шаровидной формы меньше ослабляет металлическую основу, чем пластинчатый. Отливки из высокопрочного чугуна подвергаются различным видам термической обработки.

Графитизирующий отжиг. Целью такого отжига является повышение пластичности и вязкости чугуна, в структуре которого содержится свободный цементит. Отжиг осуществляется по режиму, приведенному на рис. 97. Время выдержки при отжиге зависит от содержания в чугуне марганца и фосфора: чем больше их количество, тем длительнее должна быть выдержка. В результате такого отжига цементит распадается на феррит и графит, а структура металлической основы чугуна из перлитно – цементитной превращается в перлитно-ферритную или чисто ферритную. В результате такой термической обработки высокопрочного чугуна относительное удлинение его повышается от 3 до 10%, а ударная вязкость – от 3 до 7 кгм/см² (ненадрезанные образцы), но прочность при этом несколько снижается. Микроструктура высокопрочного чугуна до отжига и после него приведена была на рис. 96.

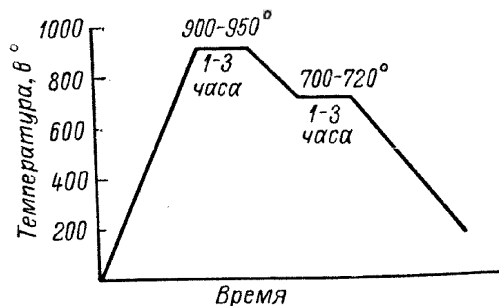


Рис. 97. График отжига отливок из высокопрочного чугуна.

Нормализация. Нормализация позволяет получить в чугуне металлическую основу – мелкопластинчатый перлит или сорбит наряду с графитом округленной формы. Нормализация отливок осуществляется по следующему режиму: нагрев до температур 925 – 950°; выдержка при этих температурах 2 – 5 час, в зависимости от исходной структуры чугуна, сложности и массивности отливок; охлаждение на воздухе. Чтобы несколько уменьшить внутренние напряжения, сложные отливки рекомендуется сначала охладить с печью (до температур 800 – 820°) и уже затем на воздухе. При нагреве крупных и сложных отливок необходимо применять специальные подставки, а для более мелких разностенных отливок – постели из песка во избежание коробления отливок. После нормализации отливки следует подвергнуть отпуску при температурах 500 – 650°. В результате нормализации предел прочности чугуна при растяжении увеличивается на 20 – 40% а твердость возрастает почти в 1,5 раза.

Закалка. Еще более высокие показатели прочности высокопрочного чугуна можно достигнуть путем его закалки и последующего отпуска. Так, на автомобильных заводах литые валы из высокопрочного чугуна подвергаются термической обработке по следующему режиму: нагрев до температуры 940°; выдержка при этой температуре 5 час; охлаждение до температуры 845° (для уменьшения внутренних напряжений); закалка в масле; отпуск при температуре 700° в течение 2 час. и окончательное охлаждение на воздухе. После такой обработки получают следующие механические свойства чугуна: предел упругости – 55 кг/мм², предел прочности на растяжение — около 70 кг/мм² и относительное удлинение – 6 %. Наиболее прогрессивным способом термической обработки высокопрочного чугуна

является изотермическая закалка. Она производится следующим образом. Отливки нагревают до температур 850 – 880°, затем погружают в селитровую ванну температурой 300 – 350° и выдерживают там 30 – 60 мин. Изотермическая закалка значительно улучшает свойства чугуна: предел прочности при растяжении увеличивается на 70 – 100%, ударная вязкость – на 80 – 200%, износостойкость – на 40 – 80%.

Отжиг для снятия литейных напряжений. Для снятия литейных напряжений в отливках из высокопрочного чугуна их подвергают отжигу. Отливки нагревают до температур 500 – 550° со скоростью 50 – 60° в час. Длительность выдержки при температуре нагрева устанавливается в зависимости от толщины стенок отливки (из расчета примерно 6 – 8 мин. на каждые 10 мм толщины стенки). Затем отливки медленно (со скоростью 30° в час) охлаждаются до температуры 200°. Окончательное охлаждение отливок производится на воздухе. При таком режиме обработки структура чугуна не изменяется, а снимаются лишь литейные напряжения. В процессе графитизирующего отжига отливок у них снимаются и литейные напряжения.

Глава XIV. ПЕЧИ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА.

Для термической обработки металлов применяются печи разнообразных типов и конструкций, в зависимости от вида обработки (закалка, отпуск и т. п.), веса и габарита изделий, рода применяемого топлива, характера производства и ряда других факторов. Термическая печь должна удовлетворять следующему основному требованию: она должна обеспечивать заданный температурный режим нагрева металла при наибольшей производительности, наименьшем расходе топлива и минимальной потере металла с окалиной. Основными данными, характеризующими работу печей, являются:

- 1) коэффициент полезного действия печи (к. п. д.);
- 2) удельный расход, топлива или электроэнергии;
- 3) удельная производительность печи в час.

К. п. д. печи называется отношение тепла, затраченного на нагрев металла, ко всему теплу, выделенному топливом при горении. Чем больше это отношение, тем лучше работает печь. *Удельный расход топлива* означает расход топлива в килограммах или кубических метрах или электроэнергии в киловатт-часах на 1 т обрабатываемой продукции.

Удельная производительность — это производительность печи в час, выраженная в килограммах на 1 м² площади пода.

Термические печи можно охарактеризовать по следующим основным признакам: по назначению, по характеру работы, по источнику нагрева. По *назначению* термические печи разделяются на отжигательные, закалочные, отпускные, цементирующие и т. д. Некоторые печи являются универсальными; их можно использовать для нагрева при отжиге, нормализации, закалке, высоком отпуске и цементации в твердом карбюризаторе. По *характеру* работы различают термические печи периодического и непрерывного действия. Печи периодического действия работают следующим образом. В печь загружается партия деталей, нагревается до определенной температуры и выдерживается при этой температуре заданное время. После извлечения изделий из печи в нее загружается новая партия изделий. Печи периодического действия применяют при индивидуальном или серийном производстве; они используются чаще всего в инструментальных и ремонтных цехах машиностроительных заводов, где термической обработке подвергают различные типы изделий при относительно небольших количествах их. Следует, однако, иметь в виду, что разнообразие термических операций, производимых в одной печи, снижает ее производительность. Поэтому при наличии в цехе нескольких печей лучше их специализировать для определенных видов термической обработки.

Печи непрерывного действия работают так. Изделия загружаются с одной стороны печи и

при помощи специальных механизмов они передвигаются вдоль печи, а выдаются с другой ее стороны. Таким образом, загрузка и выдача изделий производятся непрерывно. Эти печи строго специализированные. В них нагреваются всегда одни и те же детали, подвергаемые

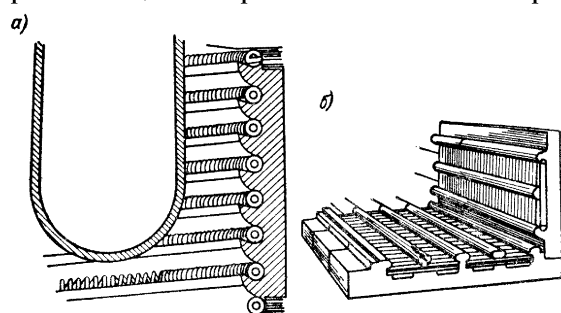


Рис. 98. Расположение электронагревателей в печах:
а — спирального; б — ленточного.

одной и той же термической обработке. Различают несколько типов печей непрерывного действия, которые отличаются способом передвижения изделий вдоль печи. Печи непрерывного действия применяются при массовом производстве.

По роду применяемого топлива термические печи разделяются на пламенные, обогреваемые при сжигании твердого, жидкого или газообразного топлива, и электрические. Пламенные печи, работающие на твердом топливе, в настоящее время почти не находят применения в термических цехах,

так как они требуют топки больших объемов. Кроме того, в таких печах трудно регулировать температуру. Большее распространение в термических цехах получили пламенные печи, работающие на жидком топливе — мазуте (остаточный продукт перегонки нефти). Однако использование мазута в качестве топлива требует установки воздуходувок для его сжигания и специального хозяйства для его хранения. Точность регулирования температуры в этих печах невысокая и составляет $+10 - 15^\circ$. По указанным причинам применение мазута для термических печей в настоящее время ограничено.

Из всех пламенных печей наиболее современными и экономичными являются газовые печи. Они имеют простое устройство, позволяют регулировать температуру с точностью $+5^\circ$ и производить нагрев до 1600° . В настоящее время в термических цехах широко применяются электрические печи. Для обогрева рабочего пространства электрических печей используются нагреватели, которые при прохождении через них электрического тока вследствие высокого электросопротивления нагреваются и излучают тепло. Различают электрические печи с металлическими и с неметаллическими (карборундовыми) нагревателями. Кроме того, имеются электрические печи — ванны, в которых нагревающимся сопротивлением служат расплавленные соли.

Наиболее распространены электрические печи с металлическими нагревателями, которые изготавливаются из сплавов, обладающих высоким электросопротивлением. Чаще всего для этой цели используются сплавы никеля с хромом (нихромы), а также сплавы на железной основе (в виде проволоки или ленты), содержащие значительное количество хрома и алюминия. Для получения высокого электросопротивления металлический нагреватель должен быть значительной длины. Для этого проволока навивается в виде спирали, а лента укладывается зигзагообразно и затем укрепляется в рабочем пространстве печи. Обычно металлические нагреватели располагаются на боковых стенках, на полу или под сводом печи. Некоторые способы расположения в печи металлических нагревателей показаны на рис. 98. При необходимости получения в печи температур выше $1100-1200^\circ$ применяют неметаллические нагреватели, которые представляют собой стержни, изготовленные в основном из карбида кремния. Карборундовые нагреватели выдерживают температуру до 1500° . По сравнению с пламенными печами электрические печи имеют ряд важных преимуществ. Они имеют несложную конструкцию — в них нет топок, газовых каналов, дымоходов и т. п. — и позволяют наиболее полно использовать тепло ввиду отсутствия потерь с отходящими газами. Так, например, если к. п. д. пламенных термических печей равен $12 - 15\%$, то у электрических печей он составляет $50 - 80\%$. В электрических печах сравнительно легко регулируется температура.

Вместе с тем следует иметь в виду, что в электрических печах продолжительность нагрева изделий больше, чем в пламенных печах. Это объясняется тем, что в электропечах передача

тепла изделию происходит только в результате лучеиспускания нагревателя, а в пламенных печах не только вследствие лучеиспускания раскаленных газов, но и омывания ими изделия. Особенно медленно и неравномерно осуществляется нагрев в электропечах при сравнительно низких температурах (до 500 – 600°), например, при высоком отпуске. Для устранения указанного недостатка в отпускных печах устанавливают вентиляторы, создающие искусственную циркуляцию воздуха. В электрических термических печах можно осуществлять нагрев изделия до 1350° с точностью регулирования температуры $\pm 3^\circ$. Ниже рассматриваются некоторые типы электрических термических печей.

КАМЕРНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЕЧИ СОПРОТИВЛЕНИЯ.

Конструкция камерной электрической печи с металлическими нагревателями представлена на рис. 99. Наружная поверхность печи состоит из прямоугольного каркаса 1 из листового железа. Рабочая камера печи 2, где осуществляется нагрев изделий, выложена огнеупорным кирпичом (шамотом) 3. У наружных стен и над сводом рабочей камеры имеются теплоизоляционная засыпка 4 и слой изоляционного кирпича 5. Электронагреватели 6 расположены на боковых стенках и на поду печи. Чтобы предохранить подовые электронагреватели от повреждений и замыканий, их защищают подовой плитой 7. Питание электронагревателей производится от электрической силовой сети при помощи специальных вводов, вставленных в стенки печи. Для измерения температуры в своде печи помещают термопару 8. В дверце печи имеется смотровое окошечко 9 для наблюдения за нагревом изделий. Подъем дверцы для загрузки и выгрузки обрабатываемых изделий производится при помощи механизма, который приводится в действие ножной педалью 10. Электропромышленность СССР выпускает электрические камерные печи различных размеров и мощностей. Наибольшее распространение имеют печи серии Н с максимальной рабочей температурой 950°. Две цифры, стоящие рядом с буквой Н, характеризуют номинальную мощность печи в киловаттах (Н-15, Н-30 и т. п.). Характеристика печей серии Н приведена в табл. 15.

Таблица 15. Характеристика камерных электропечей серии Н

Основные данные	Тип электропечи				
	Н – 15	Н – 30	Н – 45	Н – 60	Н – 75
Размеры рабочей камеры:					
ширина:	300	450	600	750	900
длина:	650	950	1200	1500	1800
высота:	250	450	500	550	600
Напряжение, в.	380/220	380/220	380/220	380/220	380/220
Производительность, кг\ч	50	125	200	275	350
Время разогрева до 850°, ч.	5	6	7	8	10

При термической обработке небольших изделий используются камерные печи с боковой загрузкой, а при обработке массивных изделий – камерные печи с выдвижным подом (рис. 100). В этой печи под представляет собой выложенную огнеупорным кирпичом тележку, которая перемещается по рельсам. Для загрузки печи тележка выдвигается и на нее укладываются обрабатываемые изделия. Укладка производится в определенном порядке: с учетом веса и габаритов изделий и распределения температуры в рабочем пространстве печи. По окончании загрузки тележка вдвигается в печь. Передвигается тележка с помощью электродвигателя.

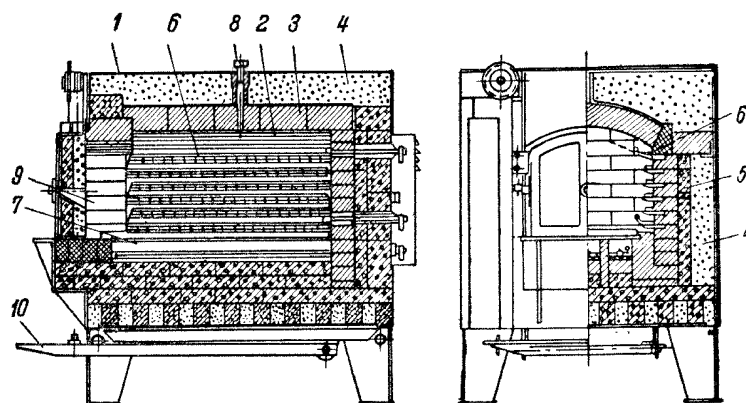


Рис. 99. Электрическая камерная печь типа Н-15.

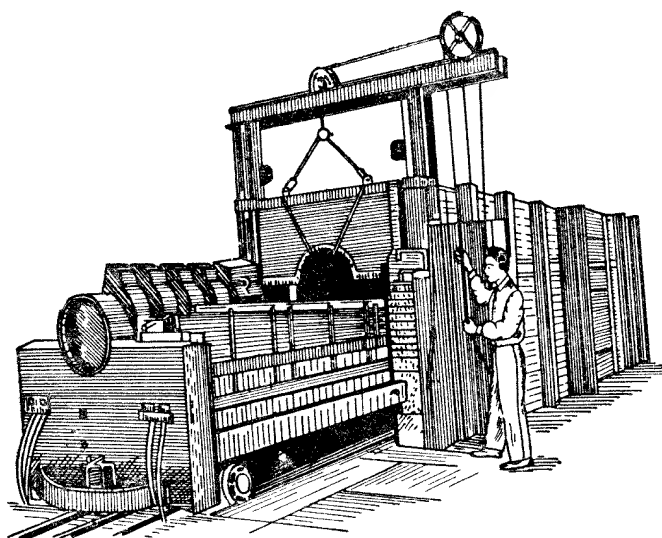


Рис. 100. Печь с выдвижным подом.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЕЧИ-ВАННЫ.

Для нагрева мелких изделий при закалке и отпуска применяют печи – ванны, у которых рабочей средой служит расплавленная соль. Печи – ванны изготавливаются двух видов: печи-ванны сопротивления и электродные печи – ванны. Печи – ванны сопротивления характеризуются внешним обогревом. Устройство такой печи показано на рис. 101. Печь – ванна снабжена тиглем 1, изготовленным из жароупорной стали. Тигель висит на чугунной плите 2. Кожух ванны 3 выполнен из листового железа. Внутренняя поверхность печи-ванны выложена шамотным огнеупорным кирпичом 4. Пространство между кладкой и кожухом заполняется теплоизоляционным материалом 5. В тигель загружаются соли, которые расплавляются в результате наружного обогрева тигля при помощи металлических электронагревателей 6 (таких же, как и в камерных печах). Сверху тигель закрывается раздвигаемой крышкой 7 с отверстиями: одно – для

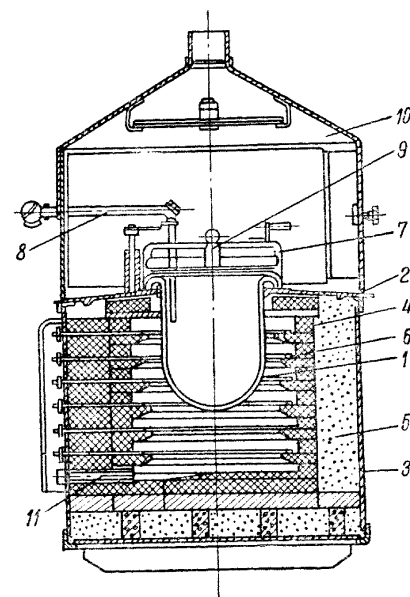


Рис. 101. Электрическая печь – ванна сопротивления.

ввода в тигель термопары 8, а второе 9 – для подвешивания приспособления с изделиями. Над каркасом печи устанавливается вытяжной колпак 10. В нижней части ванны имеется отверстие 11 для удаления соли в случае прогара тигля. Описанные печи-ванны сопротивления используются для нагрева изделий до температур 850—900°. В зависимости от мощности такие печи-ванны имеют производительность 30 – 130 кг/час.

Электродные печи – ванны характерны тем, что они не имеют металлического тигля. Обогрев изделия в них производится за счет тепла, выделяющегося при прохождении электрического тока через расплавленную соль, т. е. путем внутреннего нагрева. Принцип действия таких печей основан на том, что расплавленные соли являются хорошими проводниками электрического тока. Схема электродной соляной ванны приведена на рис. 102. К трем железным электродам 1 подается ток от трансформатора, имеющего десять ступеней регулирования и понижающего напряжения с 220/380 до 24,2 – 5,5В. Электроды опущены в расплавленную соль 2. Ток проходит через соль и нагревает ее.

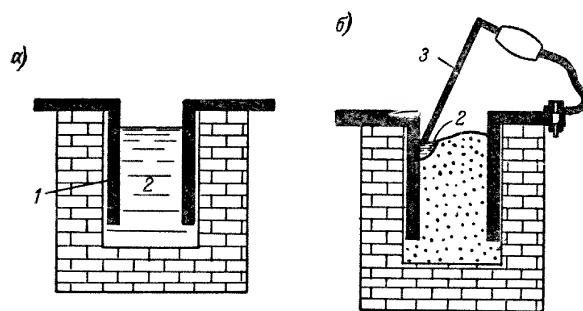


Рис 102. Схема электродной соляной ванны: а – схема ванны; б – "розжиг" ванны.

Рабочее пространство печи выкладывается из огнеупорного кирпича. Наружная поверхность ванны состоит из металлического каркаса, на котором устанавливается вытяжной колпак. Электродные печи-ванны экономичнее, чем печи – ванны сопротивления, так как в них нет потерь тепла, связанных с передачей тепла через стенки тигля. Кроме того, в них можно получить более высокие температуры – до 1300°. Поэтому электродные печи – ванны применяют для нагрева под закалку инструментов из быстрорежущей стали. Включение электродных соляных ванн представляет некоторые трудности. Поэтому при небольших перерывах в работе ванну не выключают, а закрывают огнеупорной крышкой и поддерживают в ней температуру немного выше температуры плавления соли. В твердом виде соль не является проводником электричества. Плавят соль различными методами. На рис. 102,б показана схема расплавления затвердевшей соли при помощи вспомогательного электрода, называемого шпагой. Этот вспомогательный электрод 3, представляющий собой железный прут диаметром 6 – 8 мм, зажимают в деревянной рукоятке и приближают к электроду ванны. При их сближении между основным и вспомогательным электродами возникает дуга, которая и плавит соль. Это делают до тех пор, пока участок 2 расплавленной соли не коснется другого основного электрода. Как только это произойдет, ток начнет проходить через ванну от одного основания электрода к другому, а выделяющееся при этом тепло расплавит остальную часть соли. В настоящее время находят применение электрические печи – ванны с механизмами для перемешивания солей. Это способствует более интенсивному и равномерному нагреву изделий. Для электродных печей – ванн используются различные соли и смеси солей, в зависимости от температуры, которую необходимо получить. Наиболее часто применяемые соли приведены в табл. 16. Электрические печи – ванны обладают рядом важных достоинств по сравнению с камерными печами:

- 1) в них происходит меньшее окисление изделий;
- 2) нагрев осуществляется в 2 раза быстрее;
- 3) можно производить местный нагрев изделия, частично погрузив его в жидкую среду.

Таблица 16. Соли применяемые для электродных ванн.

Основное назначение	Название соли	Состав соли (в %)	Температура соли (в °)	
			плавления	рабочая
Для отпуска пружинных сталей	Натриевая селитра	55	218	230 – 550
	Калиевая селитра	45		
	Натриевая селитра	100	317	325 – 600
	Калиевая селитра	100	337	350 – 600
Для нагрева под закалку углеродистых и легированных сталей	Хлористый натрий	35	620	650 – 900
	Кальцинированная сода	65		
	Хлористый натрий	22	654	675 – 900
	Хлористый барий	78		
Для нагрева под закалку быстрорежущих сталей	Хлористый барий	100	810	850 – 1100
	Хлористый барий	100	960	1100 – 1350

ШАХТНЫЕ ПЕЧИ.

Для нагрева длинных изделий большое распространение получили шахтные печи. Длинные изделия здесь нагреваются в подвешенном вертикальном положении (рис. 103). При нагреве таких изделий в горизонтальном положении может иметь место искривление их под действием собственного веса. В шахтных печах производят также нагрев мелких изделий в корзинах. Электропромышленность СССР выпускает несколько типов шахтных печей для нагрева под закалку и отпуск, а также для химико-термической обработки. Особенно широкое применение нашли электрические шахтные печи для газовой цементации, азотирования и газового цианирования. Конструкция цементационной шахтной печи типа Ц показана на рис. 104. Печь состоит из металлического кожуха цилиндрической формы, внутри которого находится нагревательная камера 1. Пространство между кожухом и нагревательной камерой заполнено теплоизоляционным порошком 2. На цилиндрической внутренней стенке печи размещены металлические электронагреватели 3 в виде проволоки или ленты. Внутри нагревательной камеры устанавливается изготовленный из жароупорной стали муфель 4, в который помещают корзины 5 или приспособления с обрабатываемыми деталями. Сверху муфель закрывается плотной крышкой 6. Через крышку печи проходит вал электродвигателя 7, на котором установлен вентилятор 8, служащий для выравнивания состава газов в муфеле. При загрузке и выгрузке печи вентилятор выключают. Науглероживающая атмосфера в печи создается путем испарения или разложения керосина или пиробензола, находящегося в бачке 9, откуда он самотеком через капельницу 10, расположенную в крышке печи, поступает в виде капель в муфель. Скорость подачи капель регулируется краном 11. В крышке печи имеется отверстие с выводной трубкой 12 для выхода из печи отработанного газа. Максимальная температура нагрева печей типа Ц составляет 950°. В печь нельзя загружать влажные детали, а также держать муфель открытым и выключать вентилятор. Печи типа Ц обладают большими эксплуатационными возможностями, что видно из данных табл. 17. Суточный расход керосина на одну печь составляет 8 – 12 л. В настоящей главе дано описание лишь некоторых нагревательных устройств, имеющих наиболее широкое применение в термических цехах машиностроительных заводов.

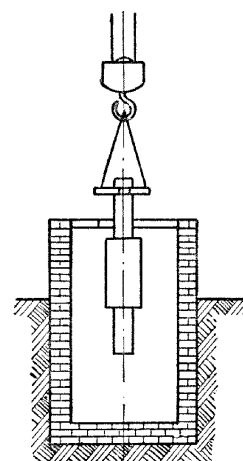


Рис. 103. Схема подвешивания изделия в шахтной печи.

Таблица 17. Характеристика шахтных печей серии Ц.

Основные данные	Тип печи					
	Ц25	Ц35	Ц60	Ц75	Ц90	Ц105
Рабочие размеры муфеля (в мм.)						
диаметр	300	300	450	450	600	600
высота	450	600	600	900	900	1700
Габаритные размеры (в мм.)						
диаметр	1520	1520	1686	1690	1870	1870
высота	1980	2150	2220	2600	2600	3050
Номинальная мощность (кВт)	25	35	60	75	90	105
Максимальная единовременная загрузка (в кг)	50	100	150	220	400	500

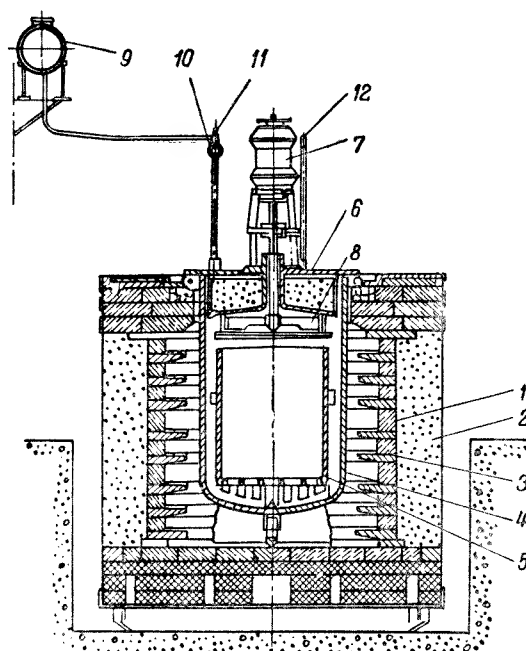


Рис. 104. Шахтная электрическая печь для газовой цементации.

Глава XV.

СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУР. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ.

Основной закон термической обработки – точное соблюдение температуры нагрева и охлаждения изделия. Малейшая небрежность в этом отношении, как правило, приводит к значительным материальным потерям. Так, например, если при закалке конструкционной стали в результате ошибки температура ее нагрева будет меньше заданной, то в структуре закаленной стали может оказаться феррит, который значительно снизит ее твердость. Если эту же сталь нагреть выше заданной температуры, то в ряде случаев вследствие роста зерна сталь приобретет значительную хрупкость. Углеродистую инструментальную сталь обычно подвергают закалке при температурах $760 - 780^{\circ}$, при этом твердость ее $H_{RC} = 60$. Но если вследствие ошибки закалить указанную сталь при температурах $700 - 710^{\circ}$, то в стали не произойдет структурных превращений и ее твердость будет составлять $H_{RC} = 20$. Таких примеров можно привести много. В прежнее время, когда не было необходимых измерительных приборов, большим искусством калильщика являлось умение на глаз правильно определить температуру стали. И в настоящее время этот способ нередко используется на производстве. Опытные термисты определяют таким путем температуру стали с точностью до 20° . Примерные значения температур, соответствующие различным цветам каления, приведены в табл. 18.

Таблица 18. Температура цветов каления.

Цвет каления	Температура (в °)
Темно – коричневый	550 – 580
Коричнево – красный	580 – 650
Темно – красный	650 – 730
Темно – вишнево – красный	730 – 770
Вишнево – красный	770 – 800
Светло – вишнево – красный	800 – 830
Светло – красный	830 – 900
Оранжевый	900 – 1050
Темно – желтый	1050 – 1150
Светло – желтый	1150 – 1250
Ярко – белый	1250 – 1300

Точность определения температуры стали по цветам каления зависит от степени освещенности цеха, утомления глаз и других причин. Поэтому такой способ неточен и ненадежен. В настоящее время имеется много различных приборов, которые позволяют сравнительно просто и весьма точно определять температуру стали. Эти приборы называются *пирометрами*. Применяются пирометры двух типов: термоэлектрические и *оптические*. В термических цехах наиболее широко распространены *термоэлектрические* пирометры. Они измеряют температуру путем непосредственного соприкосновения с горячей средой. Оптические пирометры измеряют температуру на расстоянии без соприкосновения с горячей средой. В термических цехах такие пирометры находят весьма ограниченное применение, поэтому в настоящей книге они не рассматриваются. Для измерения температур от -100° до $+400^{\circ}$ пользуются также ртутными и спиртовыми термометрами.

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПИРОМЕТРЫ.

Такое название эти пирометры получили потому, что они определяют температуру путем измерения электрического напряжения, появляющегося при воздействии температуры на чувствительный орган пирометра – термопару. Термоэлектрические пирометры находят применение при всех видах термической обработки. Эти пирометры состоят в основном из двух частей: термопары, в которой развивается электродвижущая сила, и гальванометра (милливольтметра) или потенциометра, которые измеряют величину электродвижущей силы.

Схема устройства термоэлектрического пирометра приведена на рис. 105. Термопара состоит из двух проволок тонкого сечения, изготовленных из разных металлов и сваренных друг с другом. Выбор материалов для проволок зависит от величины температуры, которую надо измерять. Место спая 1 называют горячим спаем термопары. Другие

(свободные) концы проволок 2 и 3 называют холодным спаем термопары. Свободные концы соединены при помощи медных проводов 4 с гальванометром 5, на котором имеется милливольтовая или градусная шкала. Такой гальванометр может измерять очень малые электрические напряжения. Перед началом работы стрелка гальванометра должна находиться на нуле. Если ввести в горячее пространство печи термопару, то горячий спай ее будет нагреваться, и между концами термопары 2 и 3 образуется электродвижущая сила. Под действием этой силы подвижная рамка гальванометра повернется на некоторый угол, а вместе с ней отклонится стрелка гальванометра. Чем выше температура нагрева горячего

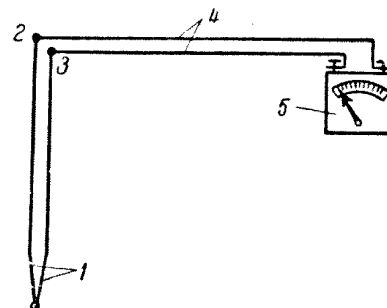


Рис. 105. Схема устройства термоэлектрического пирометра.

спая, тем большее напряжение возникает между концами термопары 2 и 3 и, следовательно, тем больше отклонится стрелка гальванометра. На этом принципе и основано применение гальванометра для измерения температур.

Чтобы по гальванометру можно было определять температуру горячего спая термопары, производят градуировку. Некоторые типы гальванометров имеют две шкалы: одну в милливольттах, а другую в градусах. На практике находят применение следующие термопары:

1. Хромель – копель (ХК). Одна проволочка изготовлена из хромеля (сплав никеля и хрома), а другая – из копеля (сплав меди с никелем). Применяется для измерения температур, не превышающих 600° .

2. Хромель – алюмель (ХА). Алюмель является сплавом на никелевой основе с добавкой алюминия, марганца и кремния. Эта термопара может быть использована для измерения температур, не превышающих 1000° .

3. Платинородий – платина (ПП). Платинородий – сплав, состоящий из 90% платины и 10% родия. Такая термопара используется для измерения температур до 1300° , а при кратковременных измерениях (несколько минут) – до 1600° . Термопару ПП не рекомендуется применять в восстановительной атмосфере, а также для измерения температур ниже 1000° , так как для этой цели могут быть использованы более дешевые термопары.

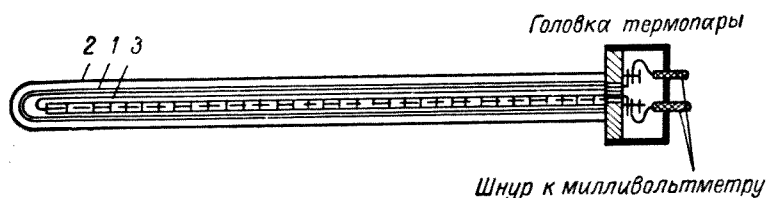


Рис. 106. Термопара с изоляционными трубками и чехлом:

1 – кварцевая трубка; 2 – наружный стальной чехол; 3 – тонкая фарфоровая трубка.

Чтобы изолировать термопару от механических повреждений и от действия печных газов, ее помещают в стальной чехол (трубку). Между стальным чехлом и термопарой вставляют кварцевую трубку для изоляции термопары от металлической трубки. В противном случае ток может пойти не по проволочкам термопары, а по стальному чехлу и показания прибора будут неправильны. Проволочки термопары, кроме места горячего спая, должны быть изолированы друг от друга во избежание контакта. Для этой цели на них (или хотя бы на одну из них) надевают фарфоровые или кварцевые трубки (рис. 106). Следует иметь в виду, что при градуировке термопар их свободные концы (2 и 3 на рис. 105) имели температуру 0° . В термическом цехе температура всегда выше 0° , следовательно, показания термопары будут неточными. Чтобы получить точные результаты, нужно перед измерением температуры переставить стрелку гальванометра с 0° на температуру помещения или внести в показания пирометра соответствующую поправку. В некоторых случаях при помощи так называемых компенсационных проводов отводят свободные концы термопары в место с постоянной низкой температурой. В термическом цехе должно быть несколько термопар. Одну из них следует бережно хранить и использовать только для проверки правильности показания других термопар. Результаты измерения температуры могут быть неточными, если не соблюдаются следующие основные правила пользования термопарой:

- 1) термопару нужно устанавливать в печи так, чтобы ее конец находился на расстоянии не менее 200 мм от стенки печи;
- 2) конец термопары не должен подвергаться действию пламени или находиться близко к нагревателям электрических печей;
- 3) конец термопары должен располагаться как можно ближе к нагреваемым изделиям, но так, чтобы не повредить термопару при загрузке и выгрузке изделий;

4) при отсчете температур по гальванометру с зеркальной шкалой надо располагать глаз таким образом, чтобы отражение стрелки в зеркале гальванометра было закрыто самой стрелкой. Термопары для измерения температур в печах имеют вид прямой штанги, а термопары, работающие в жидких средах, обычно согнуты под прямым углом. Применяют также так называемые поверхностные термопары.

Самопишущие термоэлектрические пирометры.

Неудобство пользования обычным термоэлектрическим пирометром состоит в том, что термисту нужно систематически следить за показанием гальванометра и производить записи. Кроме того, в случае необходимости трудно установить, как протекал процесс нагрева: насколько медленно или быстро поднималась температура, была ли дана необходимая выдержка и т. п. В этом отношении удобнее пользоваться самопишущими термоэлектрическими пирометрами, которые записывают процессы нагрева и выдержки, а также и охлаждения изделия, если оно производилось вместе с печью. Особенность устройства такого пирометра по сравнению с описанным выше состоит в том, что он снабжен механизмом, приводящим в движение ролик с бумагой, на которой нанесены деления (рис. 107). Стрелка 1, двигаясь вдоль шкалы 2, показывает температуру как и в обычном термоэлектрическом пирометре, но через определенные промежутки времени стрелка прижимается специальным механизмом к бумаге 3, ставит на ней точку и сразу же отходит. Бумага всё время передвигается часовым механизмом в направлении, которое указано на рис. 107 стрелкой. В результате на бумаге получается температурная кривая, которая характеризует весь процесс нагрева и охлаждения изделия. Записанная самопишущим прибором температурная кривая является документом, на основании которого можно судить не только о работе печи, но и о работе термиста, который обслуживал эту печь.

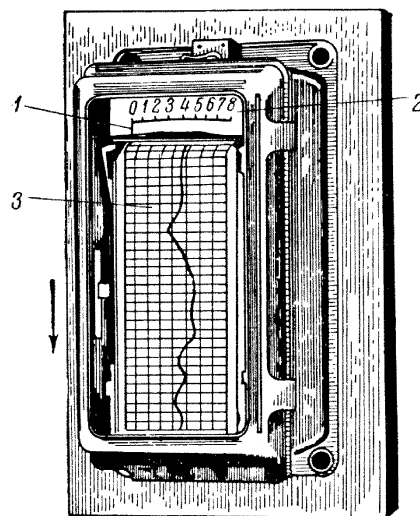


Рис. 107. Внешний вид самопишущего пирометра.

Терморегуляторы. В термических цехах широко применяются термоэлектрические пирометры, называемые терморегуляторами. Такое название они получили по тому, что не только измеряют и записывают температуру печи, но и автоматически регулируют ее работу. Термист должен лишь установить на приборе допустимый интервал колебания температуры (например, не менее 830 и не более 850°), для чего он ставит в определенное положение два указателя, которые передвигаются вдоль температурной шкалы.

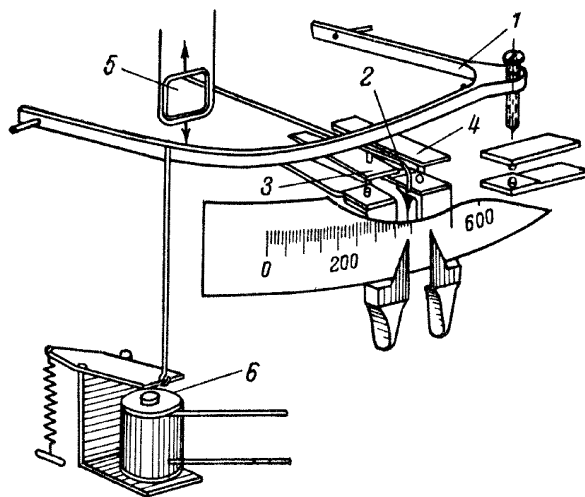


Рис. 108. Схема действия контактного гальванометра.

Для регулирования температуры вместо обычного гальванометра здесь применяют контактный, имеющий дополнительное устройство (рис. 108). Оно состоит из бугеля 1, ударяющего через определенные промежутки времени по стрелке 2, которая замыкает расположенные под ней контакты 3 или 4. Электродвижущая сила термопары, находящейся в печи, подается к подвижной рамке 5, отчего стрелка 2 отклоняется и указывает на шкале температуру печи. Контакты 3 и 4 соединены с реле, при помощи которого включается и выключается ток, питающий печь. Контакты устанавливаются против определенных делений шкалы. При повышении температуры стрелка движется вправо до тех пор, пока не окажется над контактом 4. Бугель 1, приводимый в движение электромоторчиком 6, прижмет стрелку и замкнет контакт 4. Ток при этом выключится, и печь начнет охлаждаться. Электродвижущая сила термопары будет уменьшаться, и стрелка начнет двигаться в обратную сторону. Она будет двигаться до тех пор, пока не окажется над контактом 3. При замыкании этого контакта ток включится, и печь будет снова нагреваться. Таким образом, в печи устанавливается средняя температура, колеблющаяся в определенном интервале. Некоторые терморегуляторы регулируют температуру с точностью $+ 5^{\circ}$. Терморегуляторы могут быть использованы и при работе печи на газовом и жидком топливе. С помощью указанных контактов прикрываются или открываются воздушные, газовые или нефтяные клапаны. Терморегуляторы значительно облегчают труд термиста; они обеспечивают сохранение необходимой температуры в течение всего процесса и почти полностью исключают, брак из – за несоблюдения температурных режимов.

Потенциометры. Наиболее совершенными приборами для измерения температур являются термоэлектрические пирометры, которые вместо гальванометров имеют потенциометры. Эти приборы позволяют определять температуру с большой точностью, так как на их показания не влияет изменение сопротивления внешней цепи. Принцип измерения температуры потенциометром состоит в том, что электродвижущая сила, идущая от термопары, уравнивается постоянным током, равным по величине, но противоположным по знаку. Постоянный ток получают от постороннего источника, в частности от сухого элемента. Схема действия потенциометра приведена на рис. 109. Основная цепь потенциометра состоит из сухого элемента 1, сопротивления 2 со скользящим контактом 3, термопары 4 и чувствительного гальванометра (нуль – прибора) 5. Термопара присоединяется к потенциометру таким образом, чтобы электродвижущая сила направлялась навстречу току, идущему от сухого элемента. Перемещая контакт 3 вдоль сопротивления, можно найти такое положение, при котором разность потенциалов между точками 3 и 6 будет равна величине электродвижущей силы. При этом ток в цепи прекратится, и стрелка гальванометра встанет на нуль. Вдоль сопротивления расположена шкала, на которой нанесены деления в милливольтх или в градусах. По этой шкале и измеряют температуру.

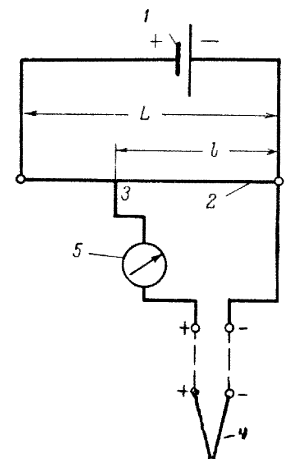


Рис. 109. Схема действия потенциометра.

В настоящее время изготавливают также самопишущие потенциометры и потенциометры, автоматически регулирующие температуру (терморегуляторы). Кроме электромеханического потенциометра, схема действия которого была рассмотрена выше, выпускаются также электронные потенциометры, описание которых можно найти в специальной литературе.

Глава XVI. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ В ТЕРМИЧЕСКИХ ЦЕХАХ.

При работе в термических цехах необходимо соблюдать ряд правил техники безопасности. Практика показывает, что несчастные случаи на производстве являются результатом неумелой и небрежной работы и следствием того, что своевременно не были приняты меры

для предупреждения опасности.

Важное значение для обеспечения безопасности работы имеет правильная организация рабочего места. Так, например, при пользовании сломанными щипцами или клещами изделие может легко выскользнуть и причинить ушиб или ожог. Особенно важно соблюдать ряд основных правил при эксплуатации печей и ванн. Перед растопкой нефтяной печи нужно открыть шибер дымохода и проверить, не "течет" ли форсунка. Если форсунка в порядке, то следует открыть кран для подачи воздуха, а затем пустить мазут и зажечь его с помощью факела. При разжигании горячей печи сначала нужно подвести горящий факел к форсуночному отверстию, затем пустить воздух и после этого – мазут.

При зажигании горючего рабочий должен находиться в стороне от смотрового отверстия в дверке печи и от форсунки. Несоблюдение этого правила может привести к ожогу лица и рук. Необходимо иметь в виду, что в теплой печи мазут превращается в газ и при воспламенении дает сильный взрыв, при этом пламя выбивается из отверстия для форсунки. При остановке печи сначала нужно прекратить подачу мазута, а затем воздуха. Это необходимо для того, чтобы в топке не накапливался нераспыленный мазут, который может неожиданно воспламениться. Под форсункой надо установить противни с песком для впитывания пролитого мазута. Перед разжиганием газовых печей рекомендуется открыть дверцы печи, а также кран для подачи воздуха. Это необходимо для того, чтобы удалить из печи скопившийся там газ. При разжигании газовых печей необходимо соблюдать те же правила, что и для нефтяных печей, т. е. сначала надо дать воздух, а потом газ.

При пользовании электрическими печами необходимо соблюдать основное правило – при загрузке и выгрузке печи, а также при ее ремонте и осмотре ток должен быть предварительно выключен. Возле электрических печей следует иметь резиновый коврик. Не рекомендуется во время работы дотрагиваться до каркаса электрической печи, так как он может находиться под током. При обслуживании электрических печей необходимо защищать глаза от ультрафиолетовых лучей. При эксплуатации соляных ванн следует соблюдать следующие основные правила.

Перед началом работы надеть положенную спецодежду. Не стоять вплотную к ванне, так как пары большинства солей вредны для здоровья человека. Не допускать загрузку ванн солью доверху, так как некоторые соли, плавясь, вспениваются. Догружать соли в расплавленную ванну только малыми порциями. Добавляемую соль нужно хорошо просушить или даже прокалить. В противном случае возможны выплеск и разбрызгивание соли, что может привести к серьезным ожогам. Загружаемые в соляную ванну изделия необходимо предварительно нагреть до температур 150 – 180°, так как при погружении холодных изделий возможен выплеск горячих солей из ванны.

Инструменты, с которыми работают в расплавленной соли, должны быть совершенно сухими, так как влага, превращаясь в пар, вызывает разбрызгивание горячей соли. Необходимо строго следить за тем, чтобы в ванну не попадали посторонние предметы (куски материи, спички, бумага и т. п.). При разогреве застывших солей опасно пробивать образовавшуюся на их поверхности твердую корку и заглядывать в ванну, так как пары, образующиеся при плавлении соли, создают повышенное давление под коркой.

Селитровые ванны нельзя нагревать выше температуры 550° - это может привести к самовоспламенению соли и взрыву. Тушить горящую расплавленную селитру нужно песком. Применение жидкостных огнетушителей или воды недопустимо, так как влага, внесенная в селитру, вызовет ее разбрызгивание. При работе с электрическими соляными ваннами следует строго помнить, что нельзя переключать ванну с одной ступени нагрева на другую при включенном рубильнике. Надо сначала выключить рубильник, а затем производить переключение.

Свинцовые ванны требуют соблюдения тех же правил безопасности, что и соляные. Кроме того, при работе с ними следует иметь в виду, что пары свинца ядовиты. Свинец прилипает к изделиям, что может привести к загрязнению рук свинцом. Рабочие, обслуживающие свинцовые ванны, должны строго соблюдать правила личной гигиены. В целях оздоровления

условий труда, а также и из экономических соображений свинцовые ванны, где возможно, следует заменять соляными. При работе с масляными ваннами очень важно не допускать увеличения температуры в ваннах выше температуры вспышки масла. В масляные ванны не должна попадать влага. Вода тяжелее масла и находится на дне ванны. При нагреве ванны до температуры выше 100° вода испаряется и увлекает за собой масло, что может привести к ожогам. Ванну, в которую попала вода, надо остановить для чистки. Правила безопасности при работе с цианистыми ваннами были приведены на стр. 179.

В заключение следует напомнить основное правило безопасной работы — никогда нельзя приступать к работе на незнакомом оборудовании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алекин Л. Е. и др. Общая технология металлов. Изд. 2 – е. Трудрезервиздат, М., 1957.
2. Блантер М. Е. и Гарбузова Н. Е. Металловедение и термическая обработка (конспект лекций). Всесоюзный заочный машиностроительный институт, М., 1957.
3. Богданов С. Г. Металловедение и термическая обработка стали. Машгиз, Л., 1954.
4. Виноградская Е. Л. Изотермическая обработка стали и опыт внедрения ее в производство. Изд – во АН Латвийской ССР, Рига, 1953.
5. Вязников Н. Ф. Термист. Metallurgizdat, M., 1957.
6. Вялых П. Н. Мой опыт работы на высокочастотной установке. Лениздат, 1956.
7. Гуляев А. П. Металловедение. Изд. 3-е. Оборонгиз, М., 1956.
8. Доронин В. М. Термическая обработка углеродистой и легированной стали. Metallurgizdat, M., 1955.
9. Захаров Б. П. Термист – универсал. Машгиз, М., 1954.
10. Захаров Б. П. Термическая обработка металлов. Машгиз, М., 1957.
11. Кащенко Г. А. Учебное пособие по металлографии. ОНТИ НКТП СССР, Л., 1937.
12. Натапов Б. С. и Благовещенский Н. А. Термическая обработка металлов. Metallurgizdat, M., 1955.
13. Погодина – Алексеева К. М. Ультразвук в металлургии и машиностроении. Изд-во «Знание», М., 1957.
14. Погодин – Алексеев Г. И. и др. Металловедение (методы анализа; лабораторные работы и задачи). Оборонгиз, М., 1956-
15. Рустем С. Л. и Гаращенко А. П. Оборудование термических цехов. Машгиз, М., 1953.
16. Самохоцкий А. И. и Лагунцов И. Н. Технология термической обработки. Машгиз, М., 1950.
17. Цетлин Б. В. Безопасность труда при процессах термической обработки металлов. Профиздат, М., 1955.
18. Шепеляковский К. З. Высокочастотная поверхностная закалка стали в машиностроении. Трудрезервиздат, М., 1955.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	2
Глава I. Краткий обзор основных свойств металлов и методов их механических испытаний	3
Физические свойства	3
Химические свойства	4
Механические свойства и методы их определения	4
Глава II. Строение металлов	14
Кристаллическое строение металлов	14
Механизм процесса кристаллизации	15
Аллотропические превращения металлов	17
Способы изучения структуры металлов	17
Глава III. Основные сведения из теории сплавов	20
Строение сплавов	20
Диаграммы состояния сплавов	22
Практическое значение диаграмм состояния сплавов	27
Глава IV. Железоуглеродистые сплавы	27
Сталь и чугун	27
Строение железа	28
Структурные составляющие стали и чугуна	29
Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов	31
Практическое значение диаграммы состояния железоуглеродистых сплавов	37
Влияние постоянных примесей на структуру и свойства стали	38
Углеродистые стали и их маркировка	39
Глава V. Основы теории термической обработки стали	40
Общие сведения о термической обработке	40
Критические температуры стали и их обозначение	41
Превращения в стали при ее нагреве	42
Превращение в стали при ее непрерывном охлаждении	43
Изотермическое превращение аустенита	46
Глава VI. Отжиг и нормализация стали	48
Характеристика отжига и его назначение	48
Отжиг с целью получения мелкозернистой структуры	48
Отжиг для получения зернистого цементита	50
Отжиг для устранения химической неоднородности стали	51
Отжиг для устранения внутренних напряжений в стали	52
Отжиг для устранения наклепа	52
Отжиг в безокислительной среде (светлый отжиг)	53
Нормализация стали	54
Глава VII. Закалка углеродистой стали	54
Сущность и назначение закалки	54
Температура нагрева стали при закалке	54
Охлаждение стали при закалке	55
Охлаждающие среды	57
Закаливаемость и прокаливаемость стали	60
Дефекты, возникающие в стали при закалке	63
Способы закалки стали	65
Глава VIII. Поверхностная закалка стали	67
Поверхностная закалка при нагреве токами высокой частоты	68

Поверхностная закалка при нагреве в электролите	72
Глава IX. Отпуск стали	72
Сущность и назначение отпуска	72
Процессы, протекающие в закаленной стали при отпуске	73
Виды отпуска	74
Глава X. Химико-термическая обработка стали	75
Цементация стали	75
Азотирование	81
Цианирование	84
Глава XI. Легированные стали и их термическая обработка	86
Характеристика легированных сталей и их маркировка	86
Влияние легирующих элементов на структуру и свойства стали	87
Особенности термической обработки легированной стали	88
Пороки легированной стали	91
Термическая обработка пружин	93
Глава XII. Термическая обработка быстрорежущей стали	96
Характеристика быстрорежущей стали	96
Термическая обработка быстрорежущей стали	96
Способы повышения стойкости инструментов из быстрорежущей стали	100
Дефекты быстрорежущей стали	101
Глава XIII. Термическая обработка чугуна	101
Структура и свойства серого чугуна	101
Термическая обработка отливок из серого чугуна	103
Термическая обработка отливок из высокопрочного чугуна	105
Глава XIV. Печи для термической обработки	106
Общая характеристика	106
Камерные электрические печи сопротивления	108
Электрические печи – ванны	109
Шахтные печи	111
Глава XV. Способы измерения и контроля температур. Общие сведения	112
Термоэлектрические пирометры	113
Глава XVI. Техника безопасности в термических цехах	116
Литература	119

Борис Абрамович Крупицкий "Основы термической обработки"

Редактор М. С. Червова.

Технический редактор Л. Г. Левоневская.

Корректор А. Г. Ткалич.

Сдано в набор 31/III 1959 г. Подписано к печати 2/VI 1959 г. Формат бумаги 84×108¹/₃₂.
Физ. печ. л. 15,75 л. Усл. печ. л. 12,92 Уч.-изд. л. 12,39. Тираж 10000 экз. М-41330. Заказ № 674.

Лениздат, Ленинград, Торговый пер., 3
Типография имени Володарского Лениздата, Фонтанка, 57.
Цена 5 р. 35 к.